



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

معهد الصيانة والأمن الصناعي Institut de Maintenance et de sécurité industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

## MÉMOIRE

de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Industriel

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

**Thème :**

**Etude des performances thermiques  
d'une installation solaire de chauffage  
d'eau sanitaire (Base de vie)**

*Présenté par :*

**KAOUBA Abdelhadi et KROUR Ahmed**

*Devant le jury composé de :*

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
AOUIMER Yamina	MAA	IMSI (Université d'Oran 2)	<b>Président</b>
REGUIEG YSSAAD Sadek	MAA	IMSI (Université d'Oran 2)	<b>Encadreur</b>
BELKHODJA Leila	MCB	IMSI (Université d'Oran 2)	<b>Examineur</b>

Année universitaire : 2021/2022

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous tenons à remercier DIEU clément et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.*

*Nous remercions infiniment, sans cesse, sans limite nos parents pour tous ce qu'ils ont fait pour nous et le font depuis longtemps, le sacrifice et le soutien inconditionnés.*

*On tient à remercier très chaleureusement notre promoteur Monsieur Sadek Reguieg Yssaad enseignant à l'IMSI Université Oran2 d'avoir accepté d'être notre encadreur dans ce travail de fin d'études. Ses conseils et son soutien ont été pour nous un vrai support scientifique et personnel. Qu'il trouve ici l'expression de notre respect et de notre profonde reconnaissance.*

*Nous adressons nos remerciements aux membres de jury d'avoir accepté de nous faire l'honneur de juger ce travail.*

*Nous sincères remerciements pour tous les enseignants du département de Génie industriel.*

*Enfin, nous remercions toute personne ayant aidé à l'achèvement de ce travail.*

**Abdelhadi Kaouba**

**Ahmed Krour**

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Energie Solaire</b>	
I.1 Introduction .....	2
I.2 Le système solaire .....	2
I.3 Le soleil .....	3
I.4 Caractéristiques du rayonnement solaire .....	5
I.5 Energie solaire .....	6
I.6 Applications de l'énergie solaire .....	6
I.7 Technologies de captage de l'énergie solaire .....	7
I.8 Mesure de l'énergie solaire : .....	15
I.9 Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire : .....	16
I.3 Conclusion .....	18
<b>Chapitre II : Généralités sur les chauffe-eaux solaire</b>	
II.1 Introduction .....	19
II.2 Principe du chauffe-eau solaire .....	19
II.3 Types de chauffe-eaux solaires .....	20
II.4 Eléments constitutifs d'une installation solaire thermique .....	23
II.4.1 Capteur solaire thermique .....	23
II.4.2 Ballon de stockage .....	26
II.4.3 Le circuit du fluide caloporteur .....	27
II.4.4 L'échangeur thermique .....	28
II.4.5 Le système d'appoint .....	28
II.4.6 Pompe à circulation .....	28
II.5 Caractéristiques des capteurs plans vitrés .....	30
II.5.1 Composition d'un capteur plan vitré .....	30
II.5.2 Paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan .....	32
II.5.3 Orientation et inclinaison d'un capteur plan .....	33
II.6 Conclusion .....	34

### **Chapitre III : Proposition d'une installation d'ECS pour une base de vie SONATRACH**

III.1	Introduction .....	35
III.2	Dimensionnement des composants principaux .....	35
III.3	Résumé des résultats de dimensionnement .....	40
III.4	Conclusion.....	41

### **Chapitre IV : Etude des performances de l'installation propos**

IV.1	Introduction .....	42
IV.2	Outils logiciels de simulation solaire .....	42
IV.3	Présentation de notre modèle d'installation .....	44
IV.4	Les composantes de notre installation.....	45
IV.5	Résultats et interprétations .....	47
IV.6	Bilan énergétique annuel .....	51
IV.7	Conclusion :.....	52

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>
---------------------------------	-----------

<b>Bibliographie.....</b>	<b>54</b>
---------------------------	-----------

## Listes 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 : chauffe-eau solaire (mono bloc).

Figure II.4 : Chauffe-eau solaire à thermosiphon (éléments séparés)

Figure II.5 : Chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré

Figure II.7 : Absorbeur à revêtement sélectif.

Figure II.8 : Un capteur plan sous vide.

Figure II.9 : Ballon de stockage avec échangeur thermique.

Figure II.10 : Pompe à circulation.

Figure II.11 : Régulation différentielle d'un chauffe-eau solaire.

Figure II.12 : Composition d'un capteur plan vitré.

Figure IV.1: Une fenêtre de résultats du logiciel Solo2000.

Figure IV.2: Une fenêtre de résultat du logiciel Simsol.

Figure IV.3 : sélection de notre modèle d'installation de chauffage d'eau.

Figure IV.4 : Installation ECS avec résistance et changement stratifié.

Figure IV.5 : paramétrage du ballon d'eau chaude.

Figure IV.6 : Paramétrage du circuit solaire

Figure IV.7 : Evolution de la température extérieure.

Figure IV.8 : Evolution du rayonnement solaire global horizontal

Figure IV.9 : Evolution des températures d'eau chaude et d'eau froide.

Figure IV.10 Evolution des consommations d'énergie solaire.

Figure IV.11 : Pertes thermiques : capteurs et tuyauterie (extérieure et intérieure).

Figure IV.12 : Evolution du rendement (circuit capteurs et système).

Figure IV.13 : Bilan énergétique annuel.

## **Listes des Tableaux**

Tableau I.1 : Irradiation solaire annuelle.

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

Tableau III.1 : Dimensionnement de la tuyauterie

Tableau III.2 : Résumé des résultats de dimensionnement d'eau chaude.

Tableau IV.1 : les composantes de notre installation

Tableau IV.2 : ballon d'eau chaude.

**Résumé.** Il s'agit dans ce travail de proposer une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie pétrolière SONATRACH située au sud Algérien, dans la région de Hassi Messaoud. Le nombre de personnes (travailleurs) installés de manière permanente dans cette base est estimé à 100 personnes. L'objectif est de proposer un schéma d'installation solaire bien adapté à cette application et de dimensionner au mieux possible ses composantes tout en montrant les calculs relatifs à chaque étape de dimensionnement. L'installation dimensionnée va être dans une étape suivante, mise à l'épreuve de plusieurs expérimentations à l'aide du logiciel de conception et de simulation solaire connu dans ce domaine T\*SOL. Les résultats des différents tests réalisés seront exprimés, discutés et analysés dans le but de parvenir à la validation de notre schéma d'installation.

**Mots clés:** Energie solaire, Chauffe-eau solaire, Capteur plan, Rendement, Simulation T\*SOL.

**ملخص.** يتضمن هذا العمل اقتراح تركيب شمسي لتسخين المياه الصحية لقاعدة معيشة بترولية سوناطراك واقعة في الجنوب الجزائري في منطقة حاسي مسعود. يقدر عدد الأشخاص (العمال) المستقرين بشكل دائم في هذه القاعدة بـ 100 شخص. الهدف هو اقتراح مخطط تركيب شمسي مناسب تمامًا لهذا التطبيق و تحديد أبعاد مكوناته على أفضل وجه ممكن مع تبيان الحسابات المتعلقة بكل خطوة. سيتم في مرحلة تالية إخضاع التركيب المقترح لعدة تجارب واختبارات باستخدام برنامج التصميم ومحاكاة الطاقة الشمسية المعروف في هذا المجال T\*SOL والتعبير عن نتائج هذه الاختبارات ومناقشتها وتحليلها من أجل التحقق من فعالية الجهاز.

**كلمات مفتاحية:** طاقة شمسية ، سخان مياه شمسي ، مجمع شمسي حراري مسطح ، مردود ، محاكاة حاسوبية T\*SOL.

**Summary.** This work involves proposing a solar installation for heating sanitary water for a SONATRACH oil base located in southern Algeria, in the locality of Hassi Messaoud. The number of people (workers) permanently settled in this base is estimated at 100 people. The objective is to propose a solar installation diagram well suited to this application and to size its components as best as possible while showing the calculations relating to each sizing step. The sized installation will be in a next phase, put to the test of several experiments using the design and solar simulation software known in this field T\*SOL. The results of the various tests carried out will be expressed, discussed and analyzed in order to achieve the validation of our installation diagram.

**Keywords:** Solar energy, Solar water heater, Flat plate collector, Yield, T\*SOL simulation.



## Introduction générale

Chaque jour, le Soleil envoie 10000 fois plus d'énergie à la Terre qu'elle n'en consomme. La connaissance et la maîtrise des techniques d'exploitation de cette énergie sont donc très convoitées. Aujourd'hui, le thème des énergies renouvelables est un sujet important car l'utilisation des énergies fossiles est de plus en plus controversée. De plus, les états encouragent de plus en plus le passage aux énergies renouvelables et, aident un nombre croissant de consommateurs, de collectivités et d'entreprises à d'utiliser la force du soleil.

L'intérêt d'utiliser des panneaux solaires apparaît vite lorsqu'on sait qu'un champ photovoltaïque de 329 km de côté, soit seulement 1,125 % de la superficie de l'Europe, pourrait couvrir la totalité des besoins mondiaux en électricité, soit 17300 TWH.[1]

Ce travail se situe justement dans ce cadre, et vise l'exploitation de l'énergie solaire via des panneaux solaires mais pas les panneaux à cellules photovoltaïques qu'on connaît tous, ce sont des panneaux solaires **thermiques**. Le but est d'exploiter cette technologie amie de l'environnement dans une application courante de la vie quotidienne. En d'autres termes, il s'agit, dans ce travail, de la conception et du dimensionnement d'une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie SONATRACH située au sud Algérien, plus exactement, dans la localité de Hassi Messaoud. Le choix de cette localité saharienne vient de son abondance en énergie de rayonnement solaire comme nous le confirmerons.

Toutefois, notre travail ne s'arrêtera pas au niveau du dimensionnement. L'installation solaire conçue et dimensionnée va être, dans une étape suivante, mise à l'épreuve par plusieurs expérimentations à l'aide du logiciel de conception et de simulation solaire connu dans ce domaine T\*SOL. Les résultats des différents tests réalisés seront exprimés, discutés et analysés dans le but de parvenir à la validation de notre installation.

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres :

- Dans le chapitre 1 nous introduisons l'énergie solaire et ses technologies de captage.
- Le chapitre 2 concerne l'architecture des installations solaires de chauffage d'eau sanitaire.
- Dans le chapitre 3 nous proposons le schéma et le dimensionnement de notre installation.
- Le chapitre 4 est dédié à la vérification des performances de notre installation par un outil de simulation thermique solaire connu dans le domaine.

# Chapitre I :

# Energie Solaire

## I.1 Introduction

L'énergie a toujours été une demande importante des êtres humains et un important moyen de développement économique et technologique. Il faut savoir que la consommation d'énergie a été multipliée par cinq entre 1950 et 2010 et devrait encore augmenter de 30 % d'ici 2030 [1].

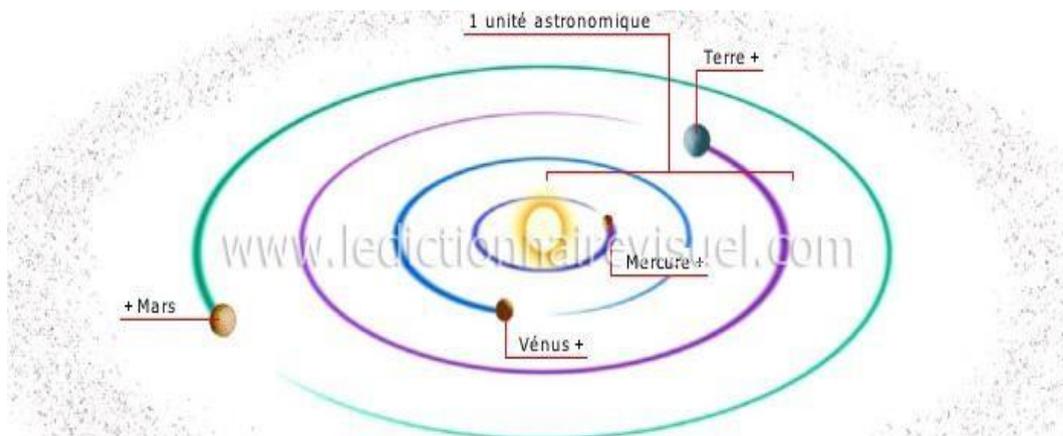
L'énergie renouvelable est une source d'énergie dont le rythme naturel de renouvellement est suffisamment rapide pour être considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humains et disponible en grande quantité.

Ce chapitre a pour but de donner un aperçu sur l'énergie solaire et les techniques de captage de cette énergie. Dans un premier temps, nous commençons par la présentation du rayonnement solaire pour ensuite définir l'énergie solaire et les différentes technologies et techniques qui permettent de capter cette énergie, leur fonctionnement ainsi que leurs performances.

## I.2 Le système solaire

Le système solaire est un petit coin de notre univers. Il se compose du soleil (le plus gros objet du système) et de tout ce qui tourne autour de lui : les planètes et leurs lunes, les astéroïdes, les comètes et les météorites. Il est né il y a 4,5 milliards d'années. Il y a 8 planètes en orbite autour du soleil (planètes intérieures et planètes extérieures) [02].

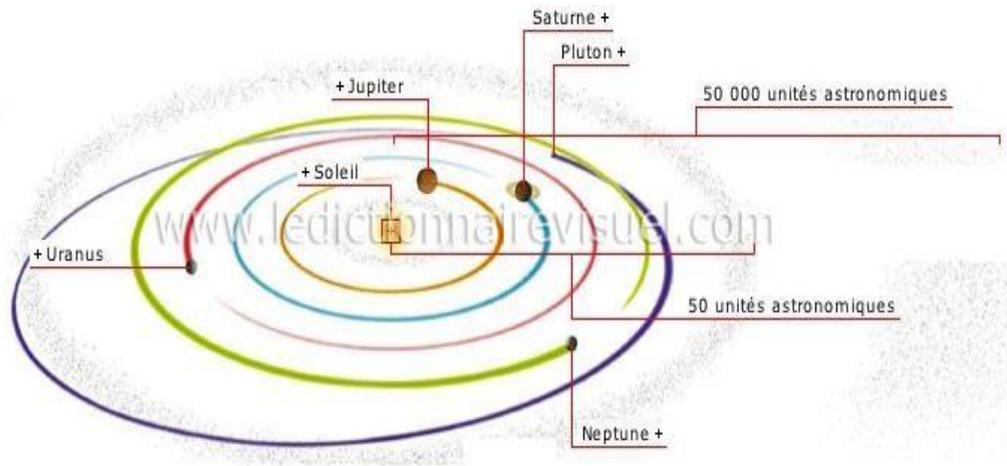
Les planètes intérieures sont : Mercure, Vénus, Terre, Mars (voir figure ci-dessous). Elles sont proches du soleil.



**Figure I.1** : Les planètes intérieures.

Les planètes extérieures sont : Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune (Voir la figure I.2). Elles

sont éloignées du soleil avec un grand diamètre et sont composées de gaz.



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

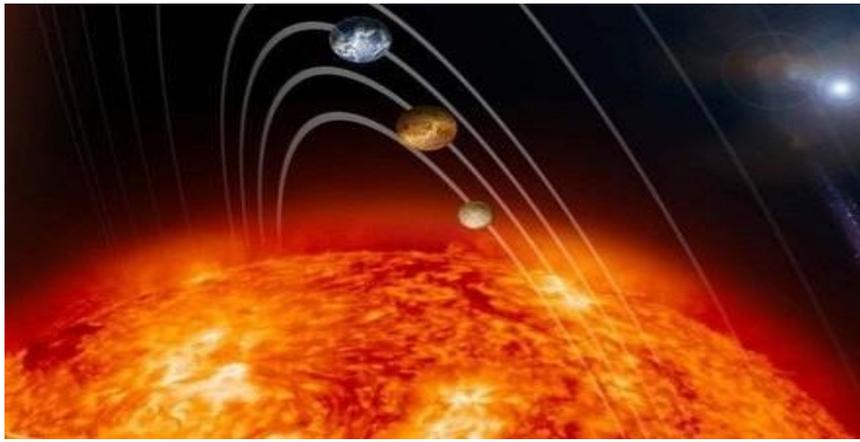
**Remarque :** Dans le système solaire on trouve d'autres planètes dites « les planètes naines ».

Ces planètes sont :

- Pluton.
- Hauméa.
- Matemale.
- Eris.
- Cérés.

### I.3 Le soleil

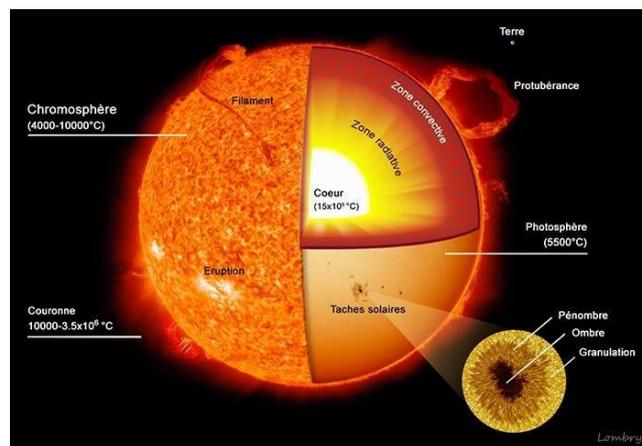
Le soleil est l'étoile du système solaire dans la classification astronomique. Selon le philosophe Théophraste, "Le soleil est constitué de petites particules de feu qui, réunies par l'exhalation de l'humidité, constituent le soleil." C'est une étoile naine jaune composée d'hydrogène (75% en masse ou 92% en volume) et de l'hélium (25 % en masse ou 8 % en volume). Le jaune borde le blanc (voir Figure I.3), et même le rayonnement solaire est responsable du climat et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur la Terre.



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

Le soleil met entre 22,5 et 250 millions d'années (année galactique) pour orbiter autour du centre de la Voie lactée. Elle orbite autour de la Terre (à 30 km/s), de sept autres planètes, d'au moins cinq planètes naines, de nombreux astéroïdes et comètes, et d'un nuage 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 [02].

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



**Figure I.4:** 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  $1353 \text{ w/m}^2$  qui varient peu dans le temps et l'espace [03].

### I.4.2 Composition du rayonnement solaire

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, ses propriétés changent. En effet, il subit la diffusion et l'absorption des composants gazeux et atmosphériques. Le spectre solaire s'étend des plus petites longueurs d'onde (rayons gamma) aux ondes radio longues [04].

La Figure I.5 montre la répartition spectrale du rayonnement solaire au sol et montre des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement en fonction de la longueur d'onde.

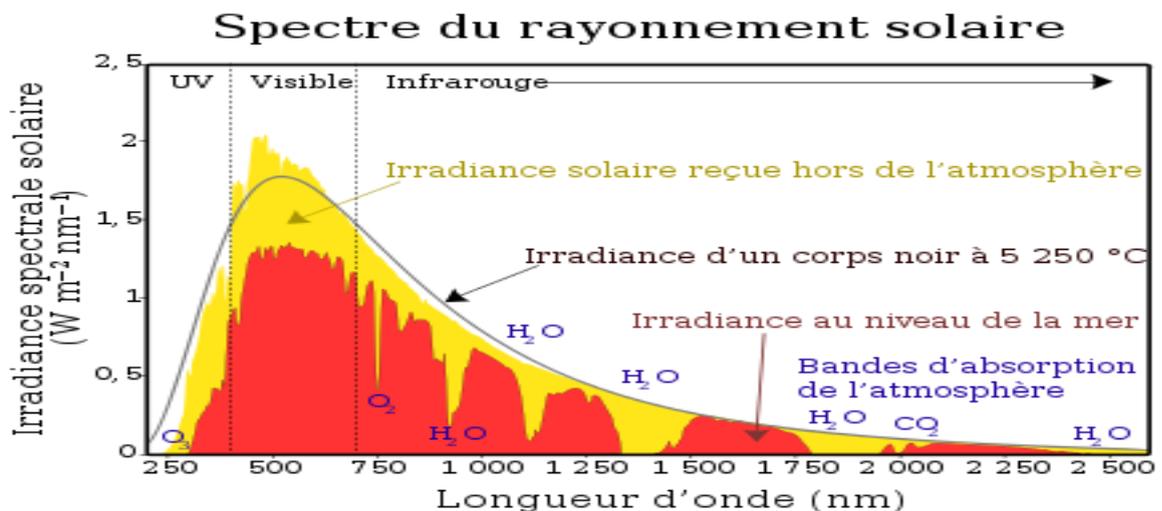


Figure I.5 : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

### I.4.3 Types du rayonnement solaire

L'atmosphère terrestre ne transmet pas tout le rayonnement solaire qu'elle reçoit au sol. Par conséquent, le rayonnement solaire peut être divisé dans les catégories suivantes [05] :

- **Rayonnement direct** : C'est le rayonnement qui traverse l'atmosphère pendant le processus de modification.
- **Rayonnement diffus** : C'est la partie du rayonnement diffusé par les particules solides ou en

suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas d'orientation préférentielle.

- **Rayonnement réfléchi** : Il fait partie du rayonnement diffusé ou réfléchi par le sol et les nuages. Ce terme est généralement réservé au sol, qui est la moyenne de leurs réflectances pour le rayonnement considéré et tous les angles d'incidence possibles. Par définition, un corps noir a un albédo nul.

## I.5 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie issue de la fusion de l'hydrogène en hélium au cœur du soleil [06]. Cette source d'énergie est soit directement rayonnée par le soleil, soit diffusée dans l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine des cycles de l'eau et du vent.

Le règne végétal s'appuie sur le règne animal pour l'utiliser en le convertissant en énergie chimique par la photosynthèse.

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

Grâce à divers processus, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile aux activités humaines, notamment en électricité ou en biomasse.

## I.6 Applications de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée dans une variété d'applications, comme indiqué ci-dessous :

- **Chauffage solaire des locaux** : Ces unités sont similaires aux chauffe-eaux solaires, mais sont de plus grande taille, car le chauffage des locaux nécessite généralement plus d'énergie. Contrairement aux besoins en eau chaude sanitaire, le besoin de chauffage solaire dans les habitations dépend de la saison.

- **Solaire passif** : L'objectif du solaire passif est d'utiliser l'énergie solaire pour concevoir et construire des bâtiments chauds en hiver et frais en été. En hiver, la lumière du soleil filtre à travers les fenêtres et les portes pour réchauffer l'intérieur du bâtiment. A l'inverse, en été, les volets restent frais. C'est ce qu'on appelle l'énergie solaire "passive", ce qui signifie qu'il n'y a pas de transfert de chaleur actif via les pompes, les vannes ou l'électricité.

- **Refroidissement solaire actif** : la chaleur solaire peut également être utilisée pour refroidir les bâtiments. La technologie repose sur la réfrigération à absorption, qui utilise l'énergie solaire au lieu de combustibles fossiles pour alimenter les refroidisseurs à absorption (souvent utilisés dans les grands systèmes de climatisation). Malheureusement, le refroidissement solaire implique une technologie très coûteuse.

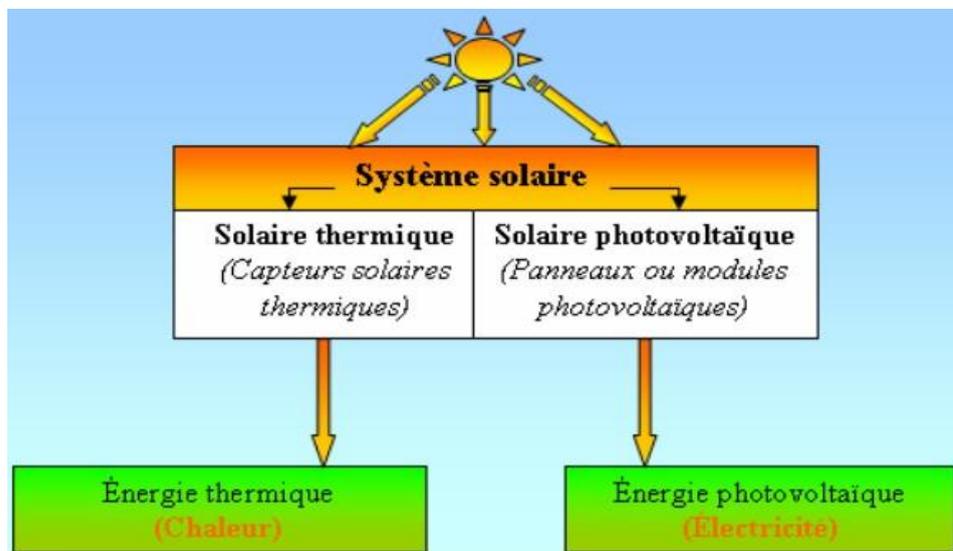
- **Désinfection, dessalement et séchage solaire** : Dans les pays chauds à fort ensoleillement, l'énergie solaire passive peut être utilisée pour désinfecter ou dessaler l'eau. L'énergie solaire est également utilisée pour sécher les récoltes directement ou en soufflant de l'air chaud.

Le rayonnement spectral sur le plan est mesuré par un instrument spécial, un pyranomètre, qui détecte et produit l'augmentation de température provoquée par le rayonnement solaire sur une surface noire.

## I.7 Technologies de captage de l'énergie solaire

Des technologies permettant de capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. Comme le montre la figure ci-dessous, on peut distinguer deux techniques de captage de l'énergie solaire qui sont :

- L'énergie solaire photovoltaïque.
- L'énergie solaire thermique.



**Figure I.6** : Formes de captage de l'énergie solaire.

### I.7.1 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite à partir du rayonnement solaire à travers les panneaux des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humains.

Les cellules photovoltaïques sont des composants fondamentaux des systèmes électroniques. Ils utilisent l'effet photoélectrique pour convertir le rayonnement électromagnétique émis par

le soleil en électricité. Plusieurs cellules sont connectées ensemble pour former un module solaire. Les modules solaires sont combinés pour former un panneau solaire (voir figure I.7).

L'électricité est soit consommée, soit stockée sur place, soit transmise par les réseaux de distribution et de transport.

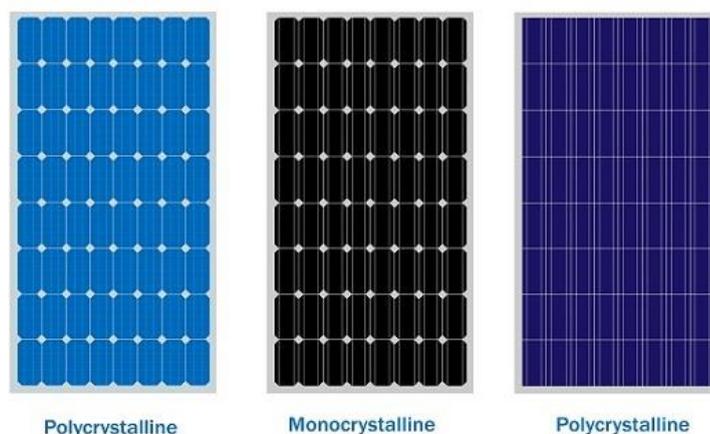
Le substrat actuellement utilisé est le silicium. Une très grande quantité de ce matériau se trouve sur notre planète, car il se compose d'environ 28% de la croûte terrestre. Cependant, pour être utilisé en électronique, le silicium doit être très pur [07].



**Figure I.7** : Un panneau solaire photovoltaïque.

### I.7.1.1 Types des panneaux solaires photovoltaïques

Il existe actuellement 3 principaux types de panneaux photovoltaïques, comme le montre la Figure I.8, différenciés par type de cellule. Toutes les cellules sont en silicium, mais les différents modes de fabrication leur confèrent des propriétés très différentes,



**Figure I.8** : Types de panneaux solaires photovoltaïques

**a. Les cellules amorphes**

Les cellules amorphes sont fabriquées à partir du gaz de silicium, qui est projeté sur du verre, du plastique ou du métal, par un processus de vaporisation. La cellule est grise très foncée. C'est le type des cellules des calculatrices et des montres solaires. Ce type de cellule est bon marché et la technique est utilisable sur de nombreux supports, notamment les supports souples. Le problème est que son rendement est 2 à 3 fois inférieur à celui des cellules monocristallines.

**b. Les cellules monocristallines**

Les cellules monocristallines sont constituées d'une seule masse fondue, elles sont donc très "pures". Elles offrent le meilleur rendement, mais sont chères à produire. 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 polycristallines**

Les cellules polycristallines 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 leur couleur est bleu nuit avec des reflets [08].

**I.7.1.2 Fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques**

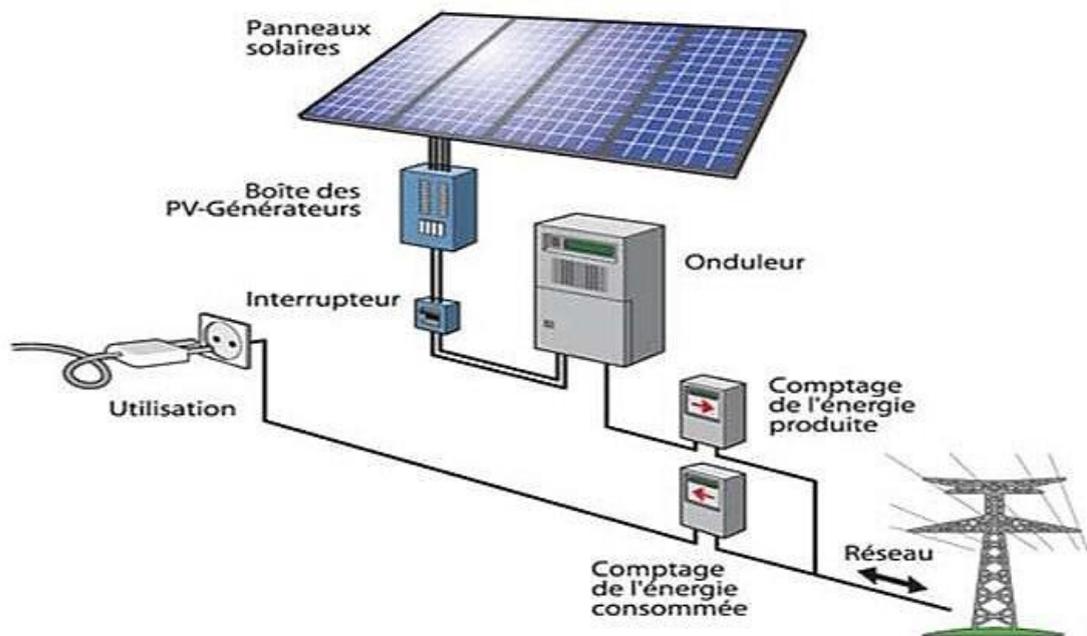
Le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques repose sur plusieurs éléments :

- Un module composé de cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie en tension continue.
- Les systèmes de montage, également appelés systèmes intégrés au toit, qui fixent les panneaux photovoltaïques à la charpente.
- Abréviation pour établir une liaison étanche entre les panneaux et le reste de la toiture.

A cela s'ajoutent les équipements électriques, notamment les onduleurs qui convertissent le DC en AC et alimentent l'habitation ou le réseau de distribution public.

Le prix d'achat des panneaux solaires photovoltaïques reste élevé, mais baisse d'année en année.[9]

La figure suivante explique le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.



**Figure I.9 :** Fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.

### I.7.1.3 Rendement d'un panneau solaire 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 optimales ( $25^\circ\text{C}$ ).

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. [10]

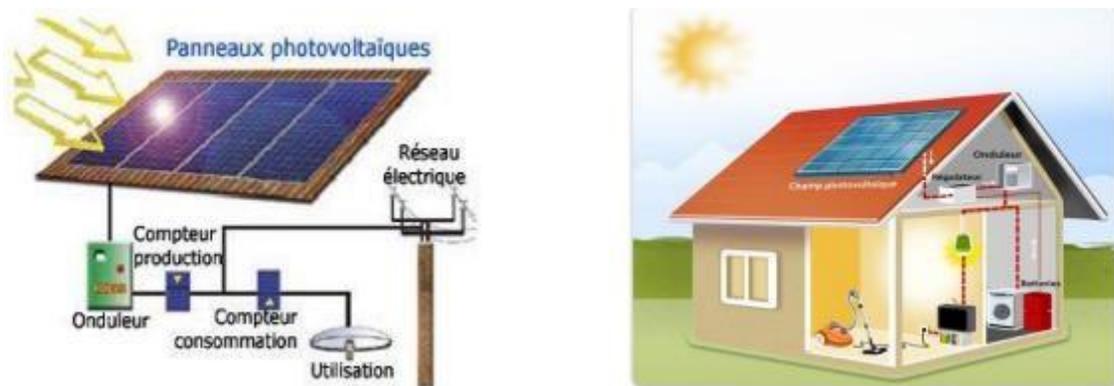
### I.7.1.4 Applications des panneaux solaires photovoltaïques

**Installations non connectées :** Calculatrices, lampes, téléphones, chargeurs, ordinateurs, sac à dos, prise... etc. qui sont illustrés dans la figure I.10.



**Figure I.10 :** Exemples d'applications non connectées des panneaux photovoltaïques.

**Installations connectées :** C'est les installations connectées aux réseaux de distribution électrique (éclairage et besoins électriques de chauffage) comme le montre la figure I.11.



**Figure I.11:** Applications connectées des panneaux photovoltaïques.

### **I.7.1.5 Avantages et inconvénients des panneaux photovoltaïques**

#### **Les avantages :**

- Les panneaux photovoltaïques fournissent une énergie verte et propre.
- Lors de l'utilisation de panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité, aucun gaz à effet de serre nocif ne sera émis.
- L'énergie photovoltaïque est l'énergie fournie par la nature, elle est donc gratuite et abondante.
- L'énergie solaire peut être utilisée presque partout où il y a du soleil, en particulier pour les réseaux intelligents avec des systèmes de production distribués.
- Le coût des panneaux solaires photovoltaïques connaît actuellement une tendance à la baisse rapide et devrait continuer à baisser dans les années à venir.
- Les panneaux photovoltaïques n'ont pas de pièces mécaniques mobiles, et dans le cas des dispositifs de surveillance mécaniques, ils subissent 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.

#### **Les inconvénients :**

- Comme toutes les sources d'énergie renouvelables, le solaire a des problèmes d'alimentation intermittents. Le soleil ne brille pas la nuit ou lorsqu'il est nuageux ou pluvieux pendant la journée. 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 convertir directement en électricité, et non de l'électricité au photovoltaïque.
- Pour une alimentation électrique continue, en particulier la connexion au réseau, les panneaux photovoltaïques ont non seulement besoin d'onduleurs, mais également de batteries, ce qui augmente considérablement le coût d'investissement des installations de panneaux solaires photovoltaïques.
- Dans le cas d'installation de panneaux solaires au sol, une surface relativement importante est nécessaire pour les déployer. En général, l'espace terrestre est réservé à cette fin pour une

période de 15 à 20 ans, voir 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 [11].

### **I.7.2 Énergie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire qui spécifie l'utilisation de l'énergie thermique rayonnée par le soleil pour chauffer un liquide, et l'énergie reçue par le liquide peut être utilisée directement ou indirectement.



**Figure I.12** : Un capteur solaire thermique.

L'énergie solaire thermique provient de la chaleur transférée par le soleil par rayonnement et ne doit pas être confondue avec d'autres formes d'énergie solaire, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque. Un capteur solaire thermique (illustré à la Figure I.12) est un outil utilisé pour convertir l'énergie lumineuse en chaleur. Le principe physique de base qui sous-tend cette énergie est l'absorption et la conduction de la chaleur spécifique.

Malgré un fort ralentissement depuis 2009, l'utilisation du solaire thermique se développe. La Chine représente 71 % de la puissance installée des capteurs, mais en puissance par habitant elle est dépassée par 7 pays, dont l'Autriche, la Grèce et l'Australie [12].

#### **I.7.2.1 Technologies de captage 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 solaire thermique :

### **a. Technologies solaires thermiques à basses températures :**

**Technologie solaire « active » :** Il s'agit traditionnellement d'applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires sont installés sur le toit du bâtiment. Un capteur solaire est un dispositif conçu pour récolter l'énergie du soleil et la transférer dans un liquide de refroidissement. La chaleur est ensuite utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire ou dans des appareils de chauffage.

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

### **b. Technologies solaires thermiques à hautes températures :**

Ce sont les technologies solaires concentrées ou « thermodynamiques », dont le processus consiste 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. [13]

#### **I.7.2.2 Efficacité et rendement**

Le solaire thermique à concentration utilise 100 % du spectre de l'infrarouge à l'ultraviolet. L'efficacité n'est limitée que par la réflectivité du concentrateur, la capacité d'isolation thermique de la turbine à vapeur autorisée par la vapeur. La technologie la plus efficace à l'heure actuelle est l'antenne parabolique, et le moteur Stirling à un rendement de 38 %. Les autres technologies, y compris celles utilisées, sont supérieures à 20 %.

La technologie la plus efficace disponible aujourd'hui est une antenne parabolique avec un moteur Stirling, qui est efficace à près de 38 %. Les autres technologies, y compris celles utilisées, représentent environ 20%. 38% des disques concentrateurs et des moteurs Stirling sont utilisés dans un seul système, typiquement 3 KW et 20% vont aux grandes centrales électriques composées de milliers de miroirs qui projettent des ombres mais génèrent des mégawatts. 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 de très hauts

rendements dans les turbines à vapeur jusqu'à 90%. Dans ces centrales, le rendement du miroir à l'électricité peut donc dépasser les 50% [13].

### **I.8 Mesure de l'énergie solaire :**

Le rayonnement spectral sur le plan est mesuré par un instrument spécial, un pyranomètre, qui détecte et produit l'augmentation de température provoquée par le rayonnement solaire sur une surface noire. Au moyen d'une thermopile, une tension proportionnelle à l'intensité de l'irradiation.



**Figure I.13:** Un pyranomètre.

La figure I.13 montre un pyranomètre qui peut mesurer avec précision plusieurs longueurs d'onde du rayonnement solaire, mais qui a un temps de réponse très long.

On utilise également des capteurs photovoltaïques qui génèrent du courant électrique en réaction au rayonnement solaire, mais sans réagir à la composante infrarouge du spectre. La figure suivante montre une cellule solaire de référence (également appelée cellule électrique ou photovoltaïque) qui réagit rapidement mais seulement à une petite partie du spectre solaire.



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

Il faut considérer que si l'on inclut la nuit et exclut les jours nuageux, le "soleil" moyen pour l'ensemble de la planète ne dépasse pas environ 250 watts par mètre carré par jour. En effet, le rayonnement est faible le matin et quasiment nul la nuit. Dans les zones à faible rayonnement solaire, l'ensoleillement moyen est inférieur à 1000 watts par mètre carré par jour. [14]

### **I.9 Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire photovoltaïque en général, et l'énergie solaire thermique en particulier, a été largement acceptée par la société. Cependant, il vaut la peine de connaître les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire pour renforcer ou contraster nos points de vue. Quand on parle d'énergie, la plupart des gens se positionnent pour ou contre un certain type (solaire, nucléaire, éolien, ...etc.).

Les arguments de positionnement sont variés : efficacité énergétique, pollution, sécurité, coût, ...etc. nous allons donc analyser le pour et le contre du solaire de la manière la plus objective possible.

#### **Les avantages :**

- L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable, elle est donc inépuisable. Bien que le soleil ait une durée de vie finie, il est considéré comme inépuisable à l'échelle humaine.
- Faible pollution et respect de l'environnement. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour produire de l'électricité ou l'utilisation de l'énergie solaire thermique pour produire de l'eau chaude sanitaire ne polluera pas et ne produira pas de gaz à effet de serre.
- Installation qui réduit les coûts d'installation et de maintenance. Les installations solaires

sont très peu coûteuses par rapport à d'autres types d'installations telles que les centrales nucléaires

- Bon pour les sites isolés. Dans les situations où l'accès au réseau est difficile, l'énergie solaire est une très bonne option.

### **Les inconvénients :**

Selon les caractéristiques de l'installation solaire, les inconvénients de l'énergie solaire peuvent être plus ou moins importants. Malgré tous les avantages, les inconvénients doivent être soigneusement analysés. Certains des inconvénients de l'énergie solaire peuvent signifier que les installations solaires peuvent ne pas être réalisables. Les aspects à considérer sont :

- Faible efficacité énergétique par rapport aux autres sources d'énergie : le rapport entre l'énergie reçue par le panneau solaire et l'énergie électrique est faible par rapport aux autres sources d'énergie comme l'énergie nucléaire.

- Coût économique par rapport aux autres options, surtout en matière d'énergie solaire thermique, les performances sont meilleures que l'énergie photovoltaïque en utilisant les caractéristiques de température et de thermodynamique.

- La performance est fonction du temps : le recours à la climatologie fait de cette source d'énergie une option irréalisable dans les régions où le ciel est souvent nuageux.

- Limitations du temps solaire : Gardons à l'esprit que dans certaines régions, l'heure solaire est plus courte, par exemple dans les pays nordiques, en hiver, il y a très peu d'heure solaire. De plus, l'inclinaison du soleil par rapport à la surface varie selon les jours de l'année. Les changements d'inclinaison du rayonnement solaire n'affectent que les performances du panneau solaire.

- Limitation de la production d'énergie stockée, car le moment où l'énergie est disponible ne coïncide pas toujours avec le moment où l'énergie doit être stockée. Pour cela, il existe des panneaux solaires et des ballons d'eau chaude, mais le rendement est encore faible [15].

### **I.3 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons introduit les concepts importants liés à l'énergie solaire. Il s'agit essentiellement des caractéristiques du rayonnement solaire et les différentes techniques de captage de cette énergie ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

L'énergie solaire est une solution énergétique verte et propre. C'est ce qui a motivé notre travail visant la conception et la simulation d'une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire. Le chapitre suivant introduit les concepts de base relatifs à cette technique.

Chapitre II :  
Généralités sur les  
chauffe-eaux solaire

## II.1 Introduction

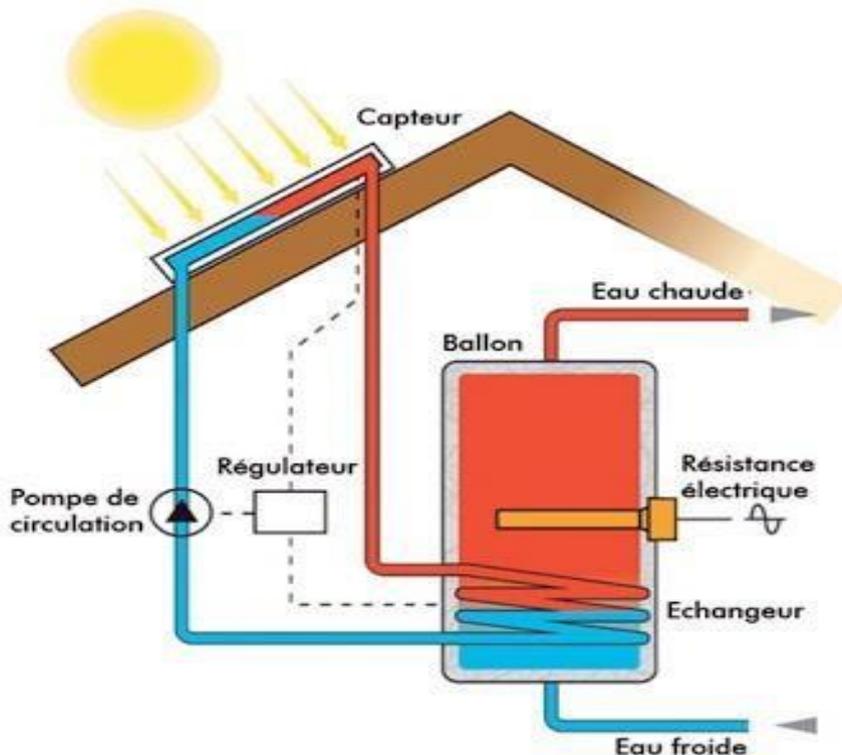
La conversion de l'énergie solaire en eau chaude est aujourd'hui le meilleur moyen de concilier haute technologie et utilisation propre des ressources naturelles. Le principe des chauffe-eaux solaires repose sur la captation de l'énergie produite par les rayons solaires et l'utilisation de cette énergie pour produire de l'eau chaude sanitaire. Par conséquent, les chauffe-eaux solaires sont considérés comme la solution du futur. Dans ce chapitre, nous présentons les concepts de base ainsi que les différents types et principaux composants de ces installations.

## II.2 Principe du chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire n'est autre qu'un système de conversion thermique de l'énergie solaire. Ce type type d'installations comprend essentiellement les éléments suivants :

- Un capteur thermique solaire.
- Un circuit de liquide ou fluide caloporteur permettant de transférer l'énergie absorbée par le capteur thermique solaire à un dispositif d'accumulation ou stockage thermique sous forme de réservoir d'eau chaude (ballon d'eau chaude).
- Le stockage thermique (ballon).
- Un réseau de distribution.

On présente le schéma principe d'une installation solaire thermique dans la figure suivant



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

**Principe de la conversion thermique** : Dès que l'énergie du soleil rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie de cette 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 vers un dispositif de stockage thermique, il la transmet via un échangeur thermique [16].

On comprend vite d'un chauffe-eau solaire est une installation qui convertit l'énergie solaire en chaleur, à l'aide de capteurs montés sur le toit ou le sol par exemple. Ils sont couverts de verre qui crée un effet de serre dans le capteur. Ces capteurs thermiques sont constitués de tubes de cuivre en contact avec l'absorbeur, contenant un liquide " caloporteur " (à base d'air ou d'eau et d'antigel). Ce dernier se réchauffe rapidement avec le rayonnement solaire. Il est alors transporté à travers des canalisations calorifugées vers un ballon de stockage, où il va transférer sa chaleur à l'eau sanitaire via un échangeur thermique [17].

### **II.3 Types de chauffe-eaux solaires**

L'énergie capté par le capteur solaire et convertie en chaleur est transférée eau fluide caloporteur et est transféré au ballon de stockage. Ainsi, selon la nature de la circulation du fluide et la disposition des composants, il existe plusieurs types de chauffe-eau solaires :

#### **II.3.1 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. Ce système n'est généralement utilisé qu'en été.



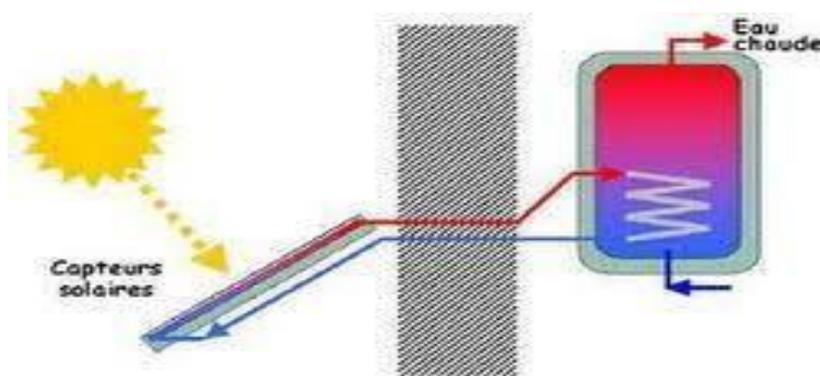
**Figure II.3 :** Chauffe-eau solaire à thermosiphon (monobloc).

### II.3.2 Le 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 ce qui 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.3.2.1 Chauffe-eau solaire à circulation naturelle (thermosiphon)

L'eau chauffée dans le capteur est envoyée dans le ballon de stockage, elle est remplacée dans le capteur par l'eau froide, qui s'échauffe à son tour et ainsi de suite [7]. La circulation de l'eau dans le circuit doit être continue tant qu'il y a du soleil et de l'eau à réchauffer, elle est généralement assez lente. L'eau chaude plus légère que l'eau froide s'accumule d'abord dans le haut du réservoir comme le montre la figure suivante.



**Figure II.4 :** Chauffe-eau solaire à thermosiphon (éléments séparés).

**Avantages :**

- Il n'inclut ni pompes ni régulation et ne nécessite pas de raccordement au réseau.
- Simple à mettre en œuvre.
- Pas de perte due à l'ajout d'un échangeur de chaleur : bonne efficacité thermique.
- Coût inférieur (en raison de l'absence d'échangeur de chaleur et d'antigel).

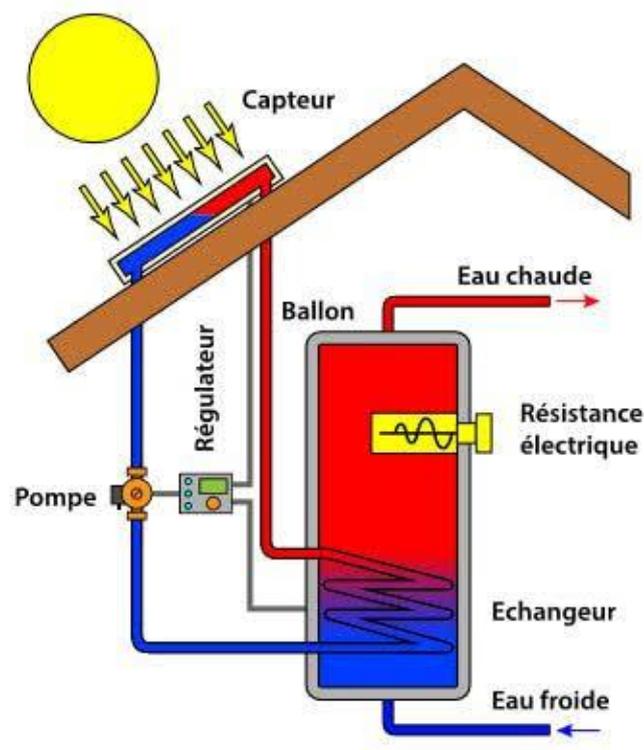
**Inconvénients :**

- Risque de gel dans le circuit (par manque d'antigel).
- Le débit de fluide caloporteur est autorégulé (circulation naturelle).
- Le capteur et le réservoir doivent résister à une pression élevée (en plein soleil).

**II.3.2.2 Chauffe-eau solaire à circulation forcée**

Cette catégorie comprend les chauffe-eaux solaires qui utilisent un circulateur pour transférer l'eau chauffée du capteur solaire vers le ballon de stockage. Contrairement aux chauffe-eaux à thermosiphon, la disposition relative du ballon et du capteur est totalement libre. C'est l'un des avantages d'un système de chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Dans les climats froids, ces systèmes peuvent offrir de meilleures performances. En revanche, dans les climats chauds, les chauffe-eaux solaires à circulation naturelle seraient recommandés en raison de leur prix inférieur et de leurs coûts de fonctionnement.



**Figure II.5 :** Chauffe-eau solaire à circulation forcée.

**Avantages :**

- Réglage du 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 gèle).
- Le capteur n'est pas soumis à de fortes pressions.

**Inconvénients :**

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

## **II.4 Eléments constitutifs d'une installation solaire thermique**

### **II.4.1 Capteur solaire thermique**

Un panneau ou capteur solaire thermique est un appareil, généralement placé sur un toit, dont la fonction est de capter l'énergie du rayonnement solaire et de la transformer en chaleur grâce à un fluide caloporteur (eau, air,...etc.). Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique repose sur l'échauffement de la paroi absorbante du capteur sous l'action de l'absorption du rayonnement solaire incident, et de l'effet de serre, c'est-à-dire, l'accumulation de chaleur dans le capteur pour un transfert direct ou par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur circulant sous cette paroi qui récupère une partie de l'énergie absorbée par convection et monte en température lors de son passage dans le capteur. Ce fluide caloporteur circulant dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers le ballon de stockage.

On distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :

- Les capteurs à circulation de fluide.
- Les capteurs à circulation d'air.

#### **II.4.1.1 Capteurs à circulation de fluide**

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. Les Capteurs plans :**

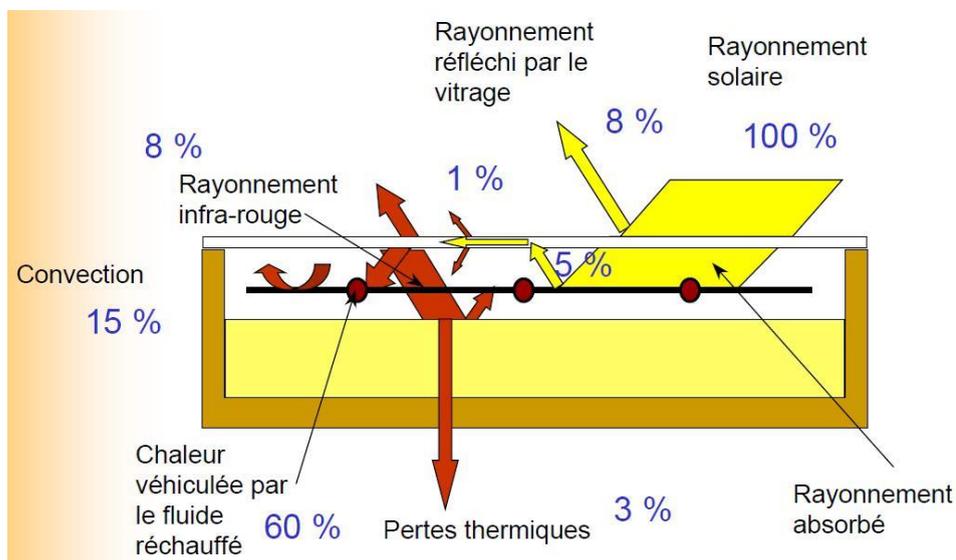
Comme leur nom l'indique, c'est des capteurs solaires thermiques de forme plane (plate).

Il existe trois types de capteurs plans :

- (1) Capteurs plans vitrés.
- (2) Capteurs plans non vitrés.
- (3) Capteurs plans à haute performance.

### (1) Capteurs plans vitrés :

Le verre est transparent au rayonnement visible et proche infrarouge, mais opaque au rayonnement infrarouge lointain émis par l'absorbeur, de sorte qu'un couvercle transparent crée un effet de serre. C'est ce principe qui est exploité dans les capteurs plans vitrés afin d'augmenter leur efficacité de conversion de l'énergie solaire en thermique. L'isolation sous et autour du capteur réduit, quant à elle les pertes de chaleur, ce qui augmente également l'efficacité. La figure suivante montre comment fonctionne un capteur plan vitré.



**Figure II.6** : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré.

Les capteurs plans vitrés sont largement utilisés où ils agissent comme des capteurs thermiques à circulation d'eau ou d'air. Ils sont mieux adaptés aux applications à température moyenne nécessitant des températures comprises entre 30°C et 70°C. Les capteurs de cycle de l'eau sont le plus souvent utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire en série, les piscines individuelles ou collectives, les usages industriels et les superpositions.

### (2) Capteurs plans non vitrés :

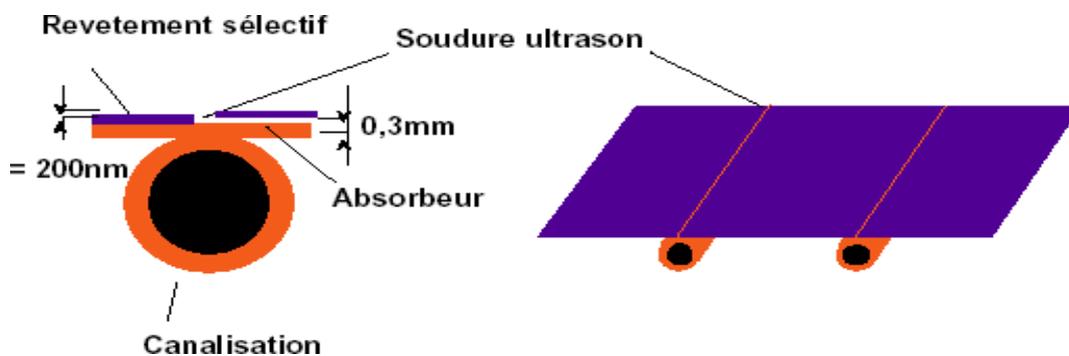
C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins efficace. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (l'absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes véhiculant le fluide caloporteur. Les capteurs plats non vitrés n'ont pas d'isolation en façade, c'est pourquoi ils conviennent aux applications à basses températures (inférieures à 30°C). Le principal domaine d'utilisation de tels capteurs est le chauffage des piscines extérieures.

Parce qu'ils n'ont pas de verre, ces capteurs absorbent beaucoup d'énergie solaire. Cependant, comme ils n'ont pas d'isolation sur leurs façades, la majeure partie de la chaleur est perdue lorsqu'il y a du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée .

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 [18].

### (3) Capteurs plans à haute performance :

**Capteurs plans sélectifs :** Certains absorbeurs ont un revêtement sélectif dont la propriété est d'émettre qu'une faible portion de l'énergie absorbée (7 à 20%). Pour la plupart des capteurs ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome. L'absorbeur sélectif améliore le rendement du capteur. Cette particularité est d'autant plus intéressante pour des climats froids et pour des applications nécessitant des températures importantes (chauffage d'eau).



**Figure II.7 :** Absorbeur à revêtement sélectif.

**Capteurs plans sous vide :** Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif. Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration. Ces capteurs conviennent bien à la production d'eau chaude en montagne ou dans les pays du nord compte tenu de leur bon

rendement pour des températures extérieures basses. [19]



**Figure II.8** : Un capteur plan sous vide.

#### **b. Les capteurs à concentration :**

Un capteur thermique solaire à concentration 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 capteurs est conçu pour générer des températures élevées jusqu'à 4000°C. Selon la géométrie on distingue trois formes de concentrateurs : concentrateurs sphériques, paraboliques, cylindro-paraboliques.

##### **II.4.1.2 Capteurs à circulation d'air**

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur.

Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à circulation de liquide.

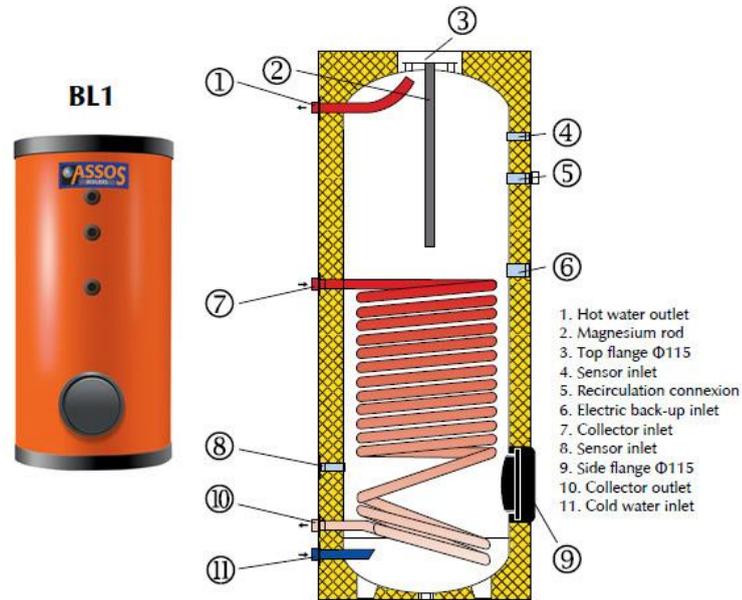
##### **II.4.2 Ballon de stockage**

Un ballon de stockage est un élément essentiel dans un chauffe-eau solaire. Comme son nom l'indique, il stocke l'eau chaude d'une sonde pour la récupérer en cas de besoin, et il peut contenir ou non un échangeur de chaleur. De plus, afin d'éviter les pertes de chaleur vers le milieu extérieur, le ballon de stockage doit être bien isolé en choisissant un matériau isolant suffisamment épais et un matériau isolant économique.

Les caractéristiques de stockage sont [20] :

- Mode accumulation de chaleur (chaleur sensible ou latente).
- Capacité thermique du stockage.

- Perte de chaleur emmagasinée.



**Figure II.9 :** Ballon de stockage avec échangeur thermique.

### II.4.3 Le circuit du fluide caloporteur

Les tuyaux sont utilisés pour la circulation du fluide caloporteur. Leur installation doit être suivie attentivement pour éviter de graves problèmes. Les boucles de tuyaux doivent être aussi simples que possible, c'est-à-dire, courtes et éviter les changements de diamètre. Les canalisations doivent être soigneusement isolées.

Le fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène-glycol) ou bien de l'air.

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

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

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

#### **II.4.4 L'échangeur thermique**

L'échangeur de chaleur chauffe l'eau grâce à la chaleur captée par le rayonnement solaire. Il est situé dans le circuit primaire, à son extrémité. Il a la forme d'un serpentin, car de cette façon, il est possible d'augmenter la surface de contact et donc l'efficacité. L'eau entrant dans le ballon, à condition qu'elle soit plus froide que le serpentin, se réchauffera. Cette eau, chauffée aux heures ensoleillées, sera disponible pour une consommation ultérieure [21].

#### **II.4.5 Le système d'appoint**

Un chauffe-eau solaire est toujours accompagné d'un chauffage d'appoint, et il doit y avoir un chauffage de secours pour fournir des plans d'eau chaude supplémentaires lorsque l'eau dans la partie supérieure du ballon de stockage n'atteint pas la température souhaitée.

Ce chauffage peut se faire dans un autre ballon dit ballon auxiliaire, ou dans le même ballon, et doit garantir même à l'ajout d'eau à tout moment que la température de l'eau chaude est correcte et insensible au rayonnement solaire et à la consommation. Selon les besoins, la source d'alimentation du chauffage d'appoint peut être du gaz naturel, de l'électricité, du mazout, ...etc. Notons également qu'un système d'appoint électrique peut être intégré ou séparé :

- **L'appoint intégré** : C'est le système le plus répandu, une résistance électrique est intégrée dans le ballon. Elle se met à fonctionner grâce au régulateur quand cela est nécessaire.
- **L'appoint séparé** : C'est la situation que nous avons lorsque nous avons déjà des cumulus, mais que nous voulons le faire avec une installation solaire. À l'époque, il fallait conserver le ballon d'origine et acheter un ballon solaire sans appoint intégré [21].

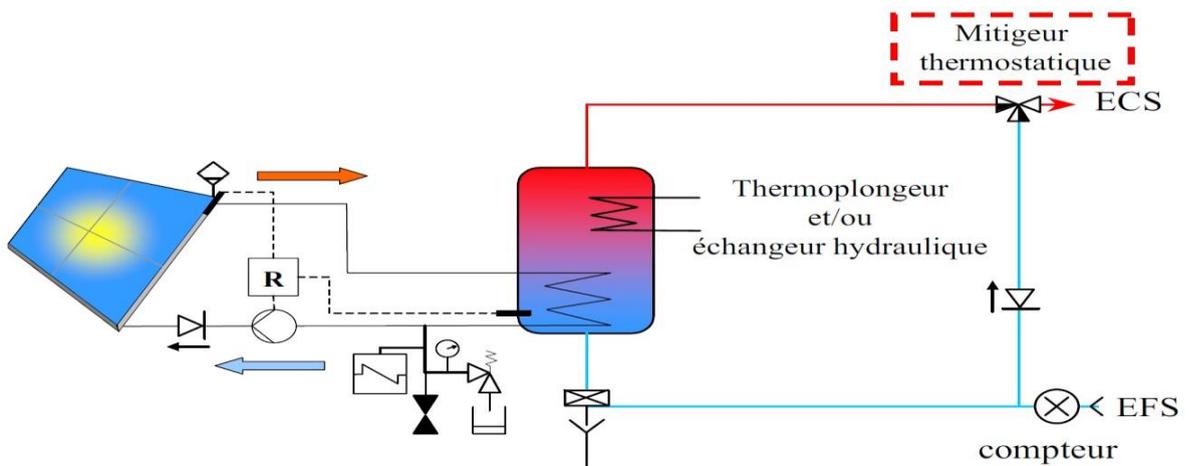
#### **II.4.6 Pompe à circulation**

Le rôle de la pompe à circulation (ou 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.



**Figure II.10 :** Pompe à circulation.

Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le ballon 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 ballon. C'est le rôle de la régulation de comparer les deux températures (à la sortie du capteur solaire et dans le ballon 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).

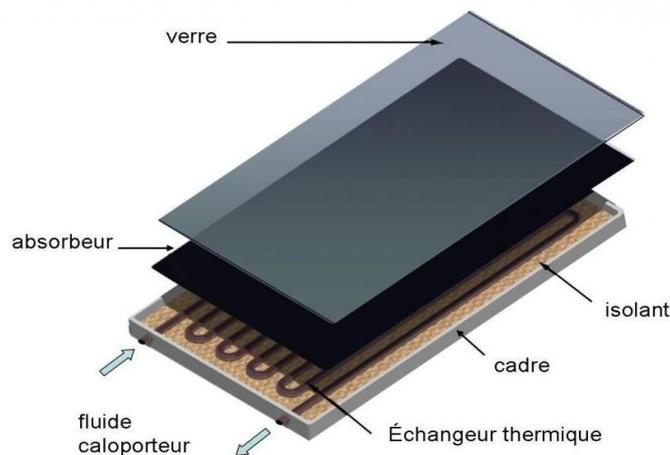


**Figure II.11 :** Régulation différentielle d'un chauffe-eau solaire.

## II.5 Caractéristiques des capteurs plans vitrés

### II.5.1 Composition d'un capteur plan vitré

Comme mentionné dans les sections présentes, un capteur plan vitré est constitué essentiellement d'un absorbeur métallique, d'une couverture transparente, d'une isolation thermique et d'un coffre.



**Figure II.12 :** Composition d'un capteur plan vitré.

#### II.5.1.1 L'absorbeur

Les absorbeurs jouent un rôle majeur dans les capteurs plans solaires. Il s'agit généralement d'un corps noir, absorbant tous les rayonnements du spectre visible, ultraviolet et une petite quantité d'infrarouge. Il convertit le rayonnement solaire capté en énergie thermique [22].

L'absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bon coefficient d'absorption.
- Bonne conductivité thermique.
- Bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et de la méthode de construction a un impact important sur la qualité du capteur construit. Le cuivre, l'acier et l'aluminium sont les matériaux les plus couramment utilisés en raison de leur conductivité élevée.

Les propriétés des différents matériaux utilisés comme absorbants sont résumées dans le tableau suivant :

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

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

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.5.1.2 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.5.1.3 L'isolation thermique**

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

- **Partie avant de l'absorbeur** : La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte

d'énergie. Pour les températures ~~u~~ de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm, en plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection.

**- 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, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

#### **II.5.1.4 Le coffre (cadre)**

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

#### **II.5.2 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.

##### **Les paramètres externes :**

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

- Les paramètres d'ensoleillement : rayonnement, position du soleil, durée d'insolation, ...
- La température ambiante.
- La vitesse du vent.

##### **Les paramètres internes :**

- Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur.
- Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.
- La température d'entrée du fluide caloporteur.
- Le débit massique du fluide caloporteur.
- Les températures des différents éléments du capteur.

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.5.3 Orientation et inclinaison d'un capteur plan**

#### **◆ Degré d'orientation :**

À cause de la 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).

#### **◆ Degré d'inclinaison :**

Le problème de l'inclinaison est le plus délicat et nécessite une étude chiffrée, mais nous constatons néanmoins que 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 égal à latitude du lieu.

## **II.6 Conclusion**

Les chauffe-eaux solaires sont utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire selon la demande. Une installation de chauffage d'eau solaire est principalement composée de capteurs solaires, d'un ballon de stockage d'eau chaude doté d'un échangeur thermique et d'une résistance électrique d'appoint, et d'une pompe à circulation.

Nous retenons de ce chapitre que pour un meilleur rendement de l'installation et une bonne couverture en eau chaude, il est important de donner l'importance au choix des composants qui vont au mieux avec le type de l'installation envisagée et à leur dimensionnement comme nous le verrons au niveau du prochain chapitre.

Chapitre III :

Proposition d'une  
installation d'ECS pour  
une base de vie  
SONATRACH

### **III.1 Introduction**

Généralement, une installation thermique solaire dimensionnée selon un optimum technico-économique couvre de 20 à 50% des besoins énergétiques annuels pour la production d'eau chaude sanitaire dans un bâtiment tertiaire ou immeuble à appartements et de 50 à 70% de ces besoins pour un logement résidentiel unifamilial, tout en assurant une autonomie complète en période estivale de plein ensoleillement.

Dans ce chapitre, il s'agit de proposer une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie pétrolière SONATRACH installée au sud Algérien, dans la région de Hassi Messaoud. Le nombre de personnes (travailleurs) installés de manière permanente dans cette base est estimé à 100 personnes. L'objectif est de proposer un schéma d'installation bien adapté à notre application et de dimensionner au mieux possible ses composantes tout en montrant les calculs relatifs à chaque étape de dimensionnement.

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

Le dimensionnement correct d'un chauffe-eau solaire commence par une évaluation appropriée des besoins en eau chaude sanitaire en fonction de la température de l'eau froide, du nombre de résidents, de leurs plans et d'autres équipements. Deux éléments doivent être bien évalués pour concevoir un chauffe-eau solaire qui répond aux besoins d'eau chaude : le volume du ballon de stockage et la surface des panneaux solaires.

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

Pour déterminer le volume du ballon nécessaire pour chauffer l'eau à la température de stockage, on doit d'abord sélectionner cette température de consigne.

##### **III.2.1.1 Choix de la température de consigne**

Cette température, dite également température de stockage, est choisie en fonction de la température souhaitée au point de décharge. 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 [23] :

- 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 du ballon de stockage

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

$$V_{ST,min} = \frac{2 \times VP \times P \times (T_{EC} - T_{EF})}{(T_{ST} - T_{EF})}$$

Avec :

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

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 (température de consigne).

**Calculons le volume du ballon pour notre base de vie abritant 100 personnes :**

$$V_{ST,min} = \frac{2 \times 30 \times 100 \times (55 - 10)}{(60 - 10)} = \mathbf{5400 \text{ Litres}}$$

Ce premier calcul nous a permis de constater que le volume de ballon doit être au minimum de 5400 litres afin d'avoir suffisamment d'eau chaude pour notre base de vie de 100 personnes pour la journée la plus froide de l'année dans la région de Hassi Messaoud. Tous les volumes du ballon ne sont pas accessibles au niveau commercial, mais on peut recommander un ballon standard de volume  $V_b = \mathbf{6000 \text{ L}}$  à échangeur thermique et appoint électrique.

### III.2.2 Dimensionnement du capteur thermique solaire

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

#### III.2.2.1 Calcul de l'énergie calorifique journalière

Elle correspond à l'énergie calorifique journalière à apporter pour chauffer l'eau à la température de consigne à partir des différentes températures d'eau froide.

Elle se calcule à partir de la formule suivante :

$$E_j = V_b \times C_P \times (T_{ST} - T_{EF})$$

Avec :

$V_b$  : Volume du ballon de stockage.

$C_P$  : Capacité thermique de l'eau.

$T_{ST}$  et  $T_{EF}$  : Température de stockage (consigne) et Température de l'eau froide.

**Calculons l'énergie calorifique journalière pour notre installation :**

$$E_j = 6000 \times 1,163 \times (60 - 10) = 348900 \text{ Wh/jour} = \mathbf{348,9 \text{ Kwh/jour}}$$

#### III.2.2.2 Calcul de la surface totale du panneau solaire

La surface totale du panneau thermique solaire ou surface totale de captage, nécessaire à notre installation d'eau chaude, se définit comme étant le rapport entre l'énergie nécessaire au chauffage de l'eau à la température souhaitée et l'énergie apportée par le rayonnement solaire au mètre carré de la localisation. La formule de calcul est la suivante :

$$S_{Tot} = \frac{E_j}{G_s}$$

Avec :

$S_{Tot}$  : Surface totale du panneau de captage solaire en  $m^2$ .

$G_s$ : Énergie du rayonnement solaire en  $KWh/m^2$ .

**Calculons la surface totale de captage solaire pour notre installation :**

$$S_{Tot} = \frac{348,9}{5,16} = \mathbf{67,61 \text{ m}^2}$$

====> Nous adoptons une surface totale de captage solaire de **70 m<sup>2</sup>**

### III.2.2.3 Calcul de nombre de capteurs solaires nécessaires :

Le nombre de capteurs solaires se déduit facilement selon la relation suivante :

$$N_P = \frac{S_{Tot}}{S_U} = \frac{70}{1} = \mathbf{70 \text{ capteurs}}$$

Tel que  $S_U$  est la surface unitaire du capteur solaire en m<sup>2</sup>. Pour notre installation, nous avons opté pour des capteurs plans de 1 m<sup>2</sup>. Donc, nous aurons besoin de **70** capteurs solaires de 1m<sup>2</sup> chacun pour notre installation.

### III.2.3 Dimensionnement de la tuyauterie

#### III.1 Tableau : dimensionnement de la tuyauterie

Emplacement	Longueur (m)	Nombre
Entre le panneau solaire et le ballon de stockage	3 (interne)	2
	3 (externe)	2
<b>Longueur totale</b>	<b>12 m</b>	

### III.2.4 Dimensionnement de l'échangeur thermique

#### III.2.4.1 Calcul de la puissance de l'échangeur :

La formule suivante permet de calculer la puissance de l'échangeur de chaleur. On remarque qu'elle est proportionnellement inverse du le temps de chauffe souhaité du ballon.

$$P_E = \frac{E_J}{\Delta t}$$

Avec :

$E_J$  : Energie totale journalière en Wh/jour

$\Delta t$  : Temps moyen de montée en température par l'échangeur en nombre d'heures.

**Calculons la puissance de l'échangeur thermique pour notre installation :**

$$P_E = \frac{348900}{6} = 58150 \text{ W} \implies P_E = 58 \text{ KW}$$

### III.2.4.2 Calcul de la conduction thermique de l'échangeur :

La conduction thermique d'un échangeur de chaleur est donnée par la formule suivante :

$$UA_E = \frac{\Phi}{\Delta T}$$

$\Phi$  : Flux thermique de l'échangeur en W.

$\Delta T$  : Ecart de température en K.

**Calculons la conduction thermique de notre échangeur :**

$$UA_E = \frac{P_E}{T_{st} - T_{ef}} = \frac{58150}{60 - 10} \implies UA_E = 1163 \text{ W/K}$$

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

L'appoint électrique sert à maintenir l'eau chaude à la température souhaitée. Dans tous les cas la puissance de la résistance doit être comprise entre 10 et 15 W/L du volume de l'appoint, sa valeur nominale est de 12W/L. Le volume d'appoint est défini par le haut du ballon et le bas de la résistance. Si la résistance est placée au centre du ballon, ce volume correspondra à la moitié du volume du ballon. De manière plus précise, la puissance d'appoint est donnée par la relation : Puissance d'appoint = Besoin journalier - Apport solaire, qui permet d'aboutir à la formule suivante :

$$P_A = \frac{E_j - G_{s,min} \times S_{Tot}}{\Delta t}$$

Avec :

$E_J$  : Energie journalière nécessaire en Wh/jour

$G_{s,min}$  : Energie du rayonnement solaire minimum de l'année en Wh/m<sup>2</sup> par jour.

$S_{Tot}$  : Surface totale du panneau de captage en m<sup>2</sup>

$\Delta t$  : Temps moyen de montée en température par la résistance en nombre d'heures.

Après des recherches, nous avons trouvé que la valeur minimum de l'énergie du rayonnement solaire à Hassi Messaoud est d'environ 3333 Wh/m<sup>2</sup>/jour. Nous avons fixé la durée de montée en température de l'eau par la résistance à 3 heures seulement et ce afin d'avoir plus de couverture en eau chaude notamment en saison hivernale.

**Calculons la puissance électrique de notre résistance d'appoint :**

$$P_A = \frac{348900 - 3333 \times 70}{3} = 38530 \text{ w} \implies P_A = 38 \text{ KW}$$

### III.3 Résumé des résultats de dimensionnement

Les données nécessaires pour le dimensionnement de notre installation solaire d'eau chaude sanitaire pour une base de vie SONATRACH située à Hassi Messaoud sont regroupées dans le tableau suivant :

#### III.2 Tableau : Résumé des résultats de dimensionnement

Caractéristiques	Valeurs
Localisation de l'installation	Hassi Messaoud
Type d'exploitation	Camping permanent
Nombre de personnes	100
Consommation journalière par personne	30
Température de l'eau chaude sanitaire T <sub>EC</sub>	55°C
Température de stockage de l'eau chaude T <sub>ST</sub>	60°C
Température de l'eau froide de l'année T <sub>EF</sub>	10°C
Volume du ballon d'eau chaude	6 m <sup>3</sup>
Surface totale de captage solaire	70 m <sup>2</sup>
Surface unitaire du capteur solaire (standard)	1 m <sup>2</sup>
Nombre de capteurs solaires	70
Longueur de la tuyauterie	12 m
Puissance de l'échangeur de chaleur	58 Kw
Conduction thermique de l'échangeur de chaleur	1163 W/K
Puissance électrique de la résistance d'appoint	38 Kw

### **III.4 Conclusion**

Nous avons effectué dans ce chapitre les calculs de dimensionnement des composants principaux d'une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie SONATRACH située au sud Algérien, dans la région de Hassi Messaoud. A cet effet, nous avons considéré les paramètres météo de cette localisation comme la température ambiante et le taux d'ensoleillement. Les résultats des différents calculs sont à première vue satisfaisants, mais devront être confrontés à une étude expérimentale pour être confirmés avant de valider notre installation proposée. Cette étude fera appel à une simulation comme nous le verrons dans le prochain chapitre.

# Chapitre IV : Etude des performances de l'installation propos

## IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'analyser des performances de notre installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie SONATRACH située au sud Algérien. Cette installation a été proposée et dimensionnée au niveau du chapitre précédent.

Il s'agit de sa mise à l'épreuve de plusieurs expérimentations à l'aide du logiciel de conception et de simulation solaire connu dans ce domaine T\*SOL. Les résultats des différents tests réalisés seront exprimés sous forme de courbes, tableaux ou d'histogrammes, discutés et analysés dans le but de parvenir à la validation de notre installation. Avant de commencer cette étude, mettons plus de lumière sur quelques outils logiciels de simulation solaire.

## IV.2 Outils logiciels de simulation solaire

### IV.2.1 Logiciel Solo2000

Solo2000 est un logiciel en ligne gratuit pour dimensionner des installations solaires thermiques en habitat individuel et dans le collectif. Il sert d'outil informatique de référence dans le cadre d'une Garantie de Résultats Solaires (GRS) mise en place par l'ADEME. Il a été réalisé à partir de deux documents de référence :

- SOLO : Méthode mensuelle d'évaluation des performances thermiques des systèmes solaires de production d'eau chaude sanitaire.
- PSD : Méthode mensuelle d'évaluation des performances des Planchers Solaires Direct.

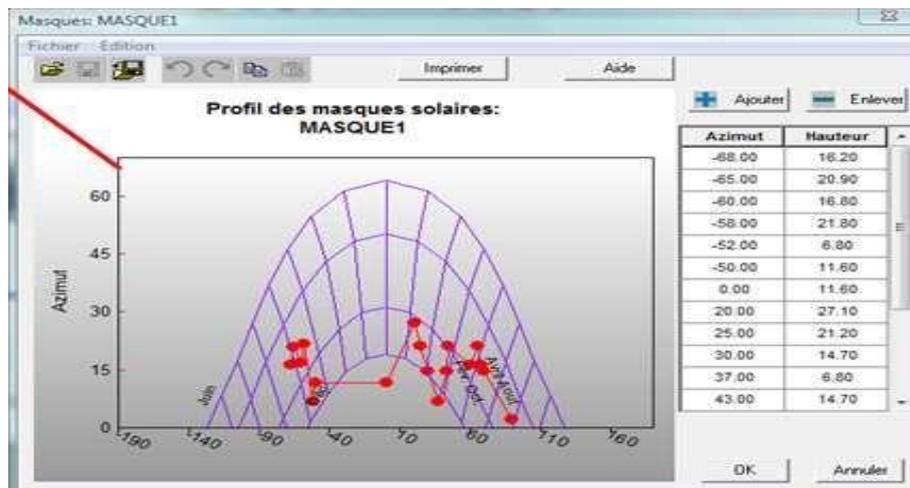
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
Couverture [%]	5	15	20	32	38	36	44	42	38	24	10	4	26
Besoins [kWh]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16361
Productivité [kWh]	96	204	346	428	498	559	551	514	387	319	149	56	4107
Productivité /m²													395

Figure IV.1 : Une fenêtre de résultats du logiciel Solo2000.

Ce logiciel est le plus utilisé par les entreprises pour sa simplicité. Concrètement, il permet de savoir avec une certaine précision le taux d'énergie solaire recueillie grâce aux capteurs solaires. En effet, après avoir entré toutes les informations sur l'installation que l'on désire étudier, celui-ci donne la couverture des besoins de l'installation en pourcentage, la productivité de l'installation en kWh ainsi que la productivité en kWh par m<sup>2</sup> de capteurs installés.

#### IV.2.2 Logiciel SimSol

Le logiciel SimSol est un outil de simulation des performances thermiques des installations de production d'eau chaude solaire collective. Il est plus complet que Solo2000 et offre un plus grand nombre d'informations. Dès le lancement du logiciel, l'utilisateur doit choisir entre plusieurs configurations d'installations solaires ~~elles~~ définies.



**Figure IV.2 :** Une fenêtre de résultats du logiciel SimSol.

#### IV.2.3 Logiciel T\*SOL

Le logiciel T\*SOL est un outil de conception et de simulation 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.

- L'outil 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 les bénéfices correspondants.

- En plus des systèmes standard, T\*SOL Pro propose 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, ... etc.

- T\*SOL Expert est 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.

Parmi les avantages de cet outil est que tous les paramètres de l'installation peuvent être aisément modifiés à l'aide de l'interface utilisateur. On peut 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 pour la planification d'installations solaires. En comparaison avec d'autres logiciels, T\*SOL présente une rapidité remarquable dans les simulations.

### IV.3 Présentation de notre modèle d'installation

Dans la conception de notre installation sur la plate-forme T\*SOL, nous avons sélectionné le type « installation ECS avec résistance électrique et dispositif de charge stratifié ». Le dispositif de charge stratifié permet de préserver le maximum d'eau chaude en haut du ballon par son système d'acheminement de l'eau froide entrante du bas du ballon, via des trous superposés verticalement selon les températures montantes en strates d'eau ou par niveau de température, dans le ballon.

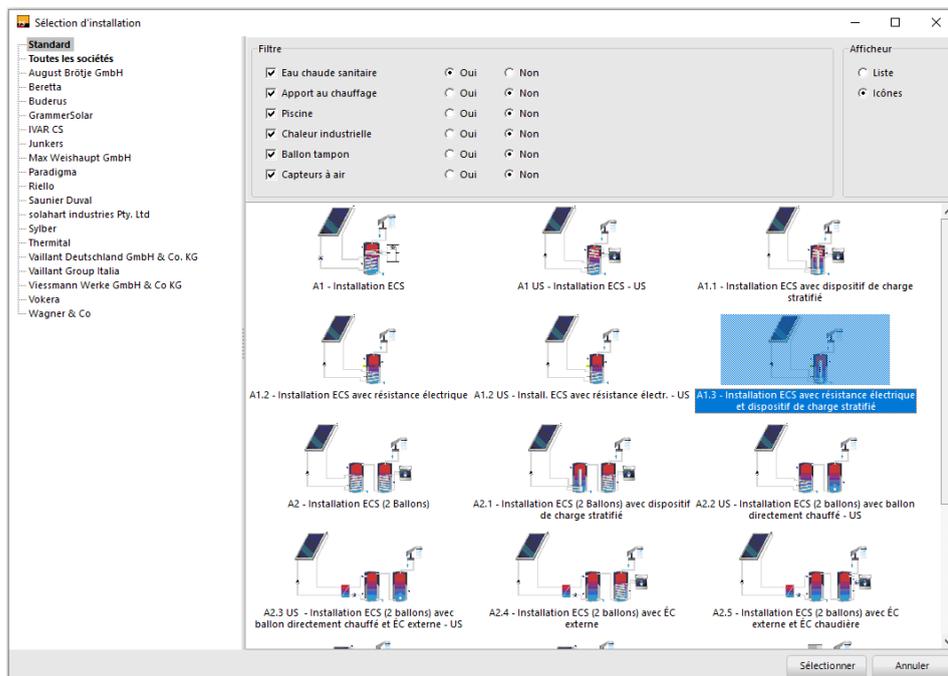
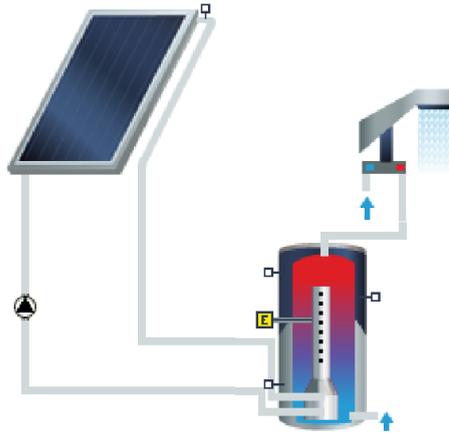


Figure IV.3 : Sélection de notre modèle d'installation de chauffage d'eau.

Le schéma de notre installation sélectionnée est donné par la figure suivante :



**Figure IV.4 :** Installation ECS avec résistance et chargement stratifié.

## IV.4 Les composantes de notre installation

### IV.4.1 Capteur solaire

Les caractéristiques techniques du capteur thermique solaire de notre installation sont représentées dans le tableau suivant :

<b>Type de capteur</b>	Capteur plan
<b>Produit</b>	Capteur plan avec revêtement sélectif
<b>Surface brute de capteur</b>	1 m <sup>2</sup>
<b>Longueur</b>	1 m
<b>Largeur</b>	1 m
<b>Facteur de conversion</b>	80%
<b>Nombre de capteurs</b>	70
<b>Inclinaison d'installation</b>	32°

Comme le montre ce tableau, le degré d'inclinaison de nos capteurs plan est de 32° c'est la moyenne annuelle du degré d'inclinaison des rayons de soleil dans la localité de Hassi Messaoud. Cette valeur permettra d'avoir un maximum d'énergie solaire captée.

#### IV.4.2 Ballon d'eau chaude

Le tableau suivant résume les caractéristiques techniques du ballon d'eau chaude sélectionné pour notre installation. Nous avons choisi une épaisseur d'isolation élevée (200mm) afin de minimiser les pertes thermiques, vu le grand volume de notre ballon. De même pour la conduction thermique de l'isolateur, qui s'est vue abaissée pour la même raison.

<b>Type</b>	Ballon ECS bivalent
<b>Volume</b>	6000 L
<b>Hauteur</b>	3 X Diamètre
<b>Epaisseur de l'isolation</b>	200mm
<b>Conduction thermique</b>	0,034W/m.K

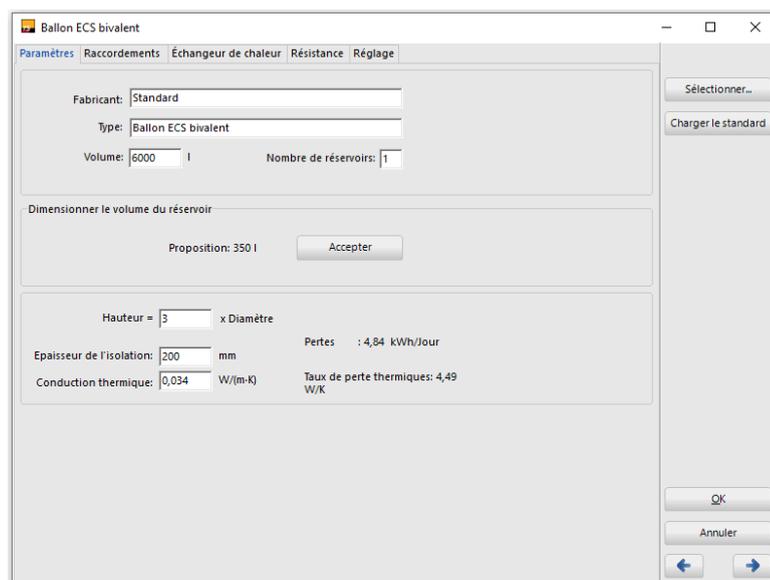
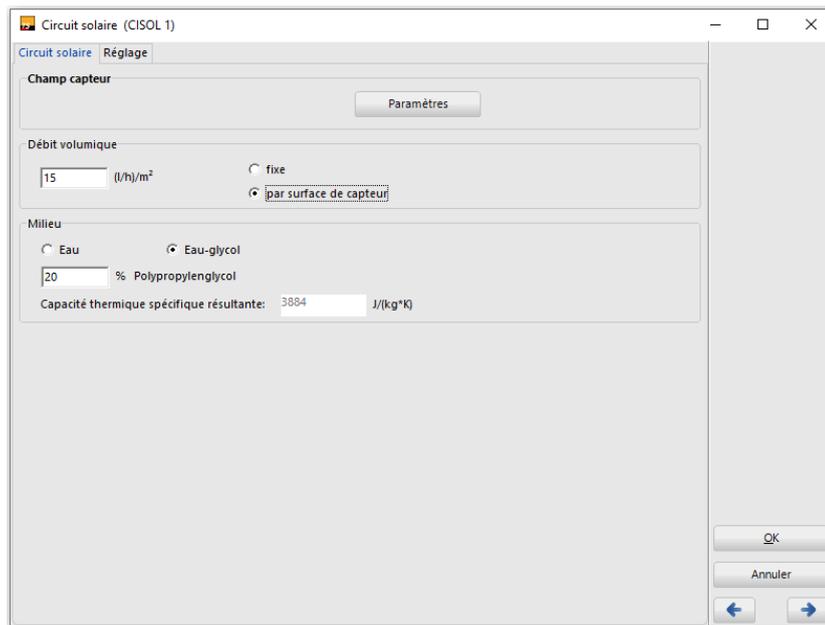


Figure IV.5 : Paramétrage du ballon d'eau chaude.

#### IV.4.3 Circuit solaire

La figure suivante est une capture de fenêtre T\*SOL résumant les paramètres relatifs à notre circuit solaire, autrement dit, le circuit du liquide calorifique de notre installation.



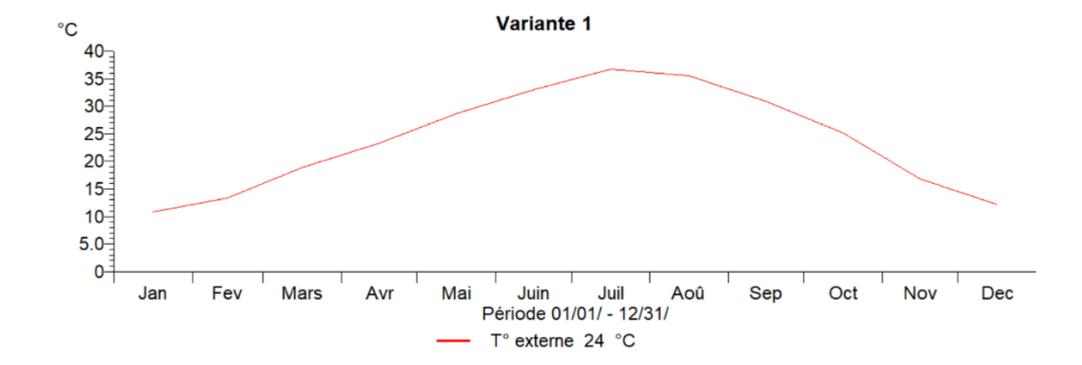
**Figure IV.6 :** Paramétrage du circuit solaire.

Cette figure montre que nous avons défini comme liquide calorifique un mélange d'eau au Polypropylenglycol à 20%, ce qui est suffisant pour éviter le gel du circuit en saison hivernale dans la région de Hassi Messaoud où la température ne descend pas trop en dessous du 0°C. On constate que la vitesse de circulation du liquide adoptée est de l'ordre de 15 Litres/Heure par m<sup>2</sup> du capteur solaire, ce qui correspond à un débit volumique du circuit de 17,5 Litres/minute.

## IV.5 Résultats et interprétations

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

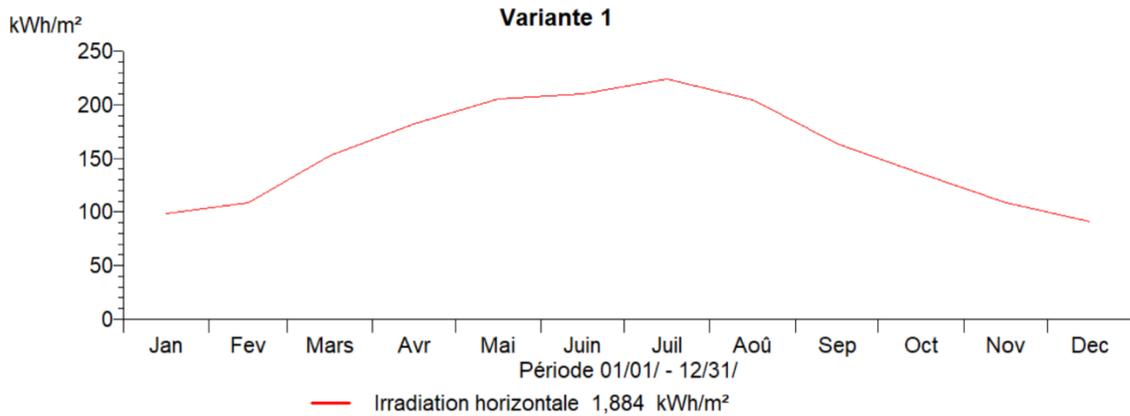
### Température extérieure :



**Figure IV.7 :** Evolution de la température extérieure

Sur cette courbe on constate que la température ambiante à la localité de Hassi Messaoud est en hiver au minimum de 10°C, par contre elle atteint un maximum de 37°C en été.

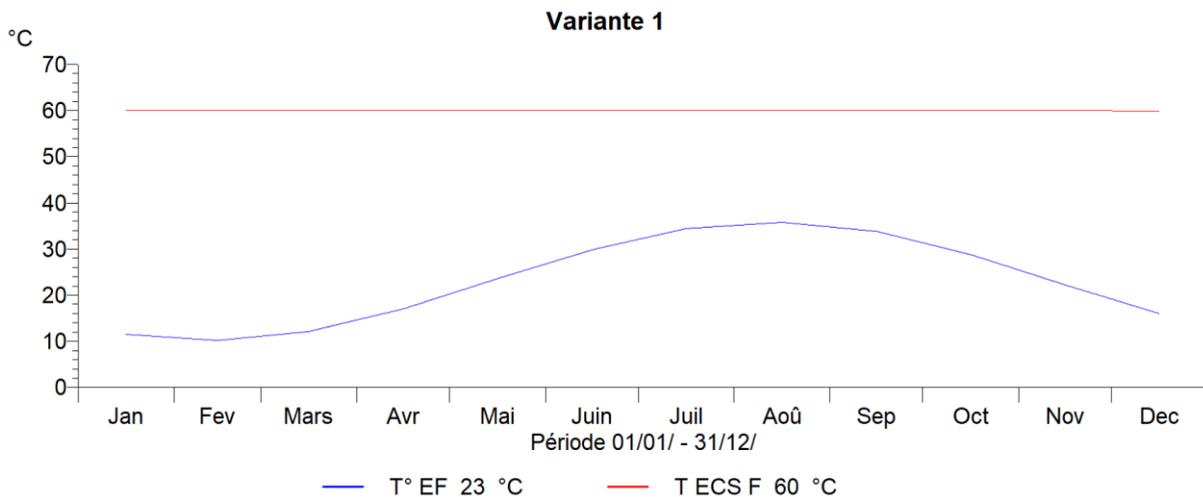
**Rayonnement solaire global horizontal :**



**Figure IV.8 :** Evolution du rayonnement solaire global horizontal

On peut constater la forme sinusoïdale de l'évolution du rayonnement solaire global dans la localité de Hassi Messaoud, avec un maximum en été et un minimum en hiver. La valeur totale de cette énergie pendant une année est de 1884 KWh/m<sup>2</sup> ce qui donne une moyenne quotidienne de 5,16 KWh/m<sup>2</sup> par jour, ce qui est très avantageux pour notre installation.

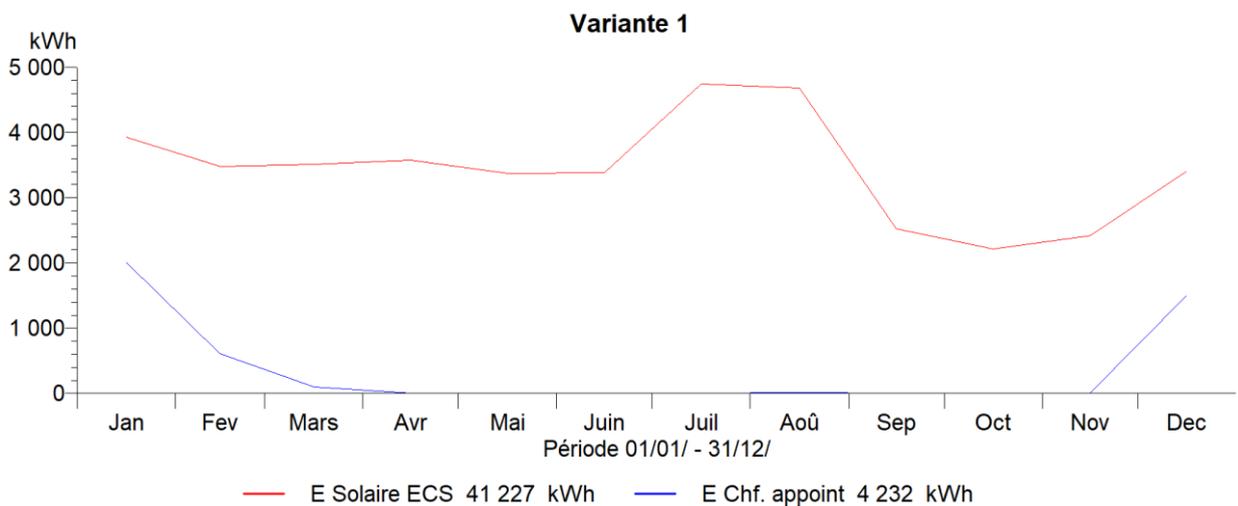
**Température de l'eau (chaude et froide) :**



**Figure IV.9 :** Evolution des températures d'eau chaude et d'eau froide.

On remarque que la température de l'eau froide monte légèrement à partir d'Avril jusqu'à Août du fait de la hausse des températures extérieures durant ces mois, tandis que celle de l'eau chaude dans le ballon reste autour de 60°C sur tous les mois de l'année y compris la période d'hiver. Ceci s'explique par le rôle de l'appoint électrique (résistance d'appoint) dans le chauffage de l'eau pendant cette période froide.

**Consommations d'énergie (solaire et d'appoint) :**

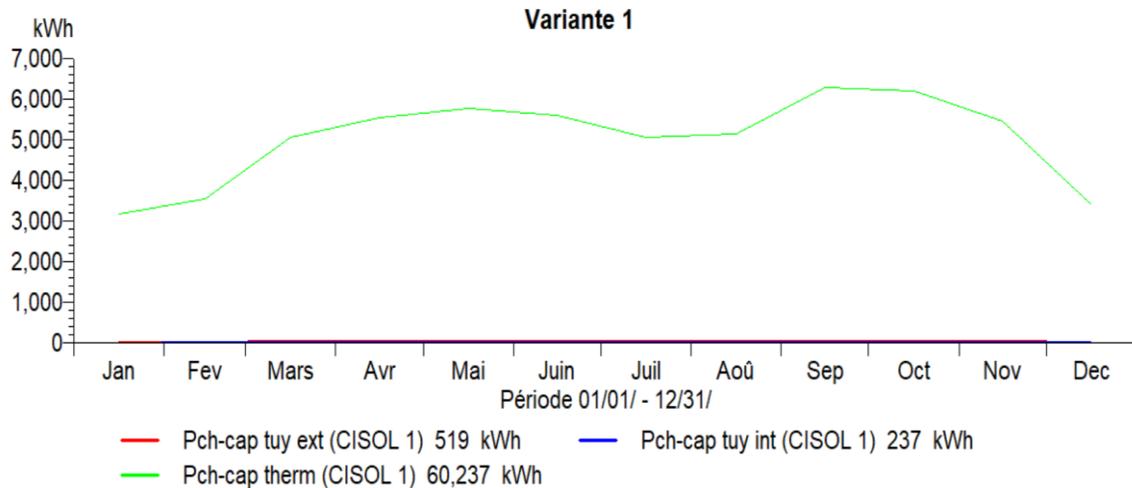


**Figure IV.10 :** Evolution des consommations d'énergie : solaire et d'appoint.

On remarque que la demande en énergie est beaucoup élevée pendant les mois les plus froids, en particulier en Décembre et Janvier alors qu'elle est basse en mois de Septembre et Octobre. Constatons également la montée de la consommation énergétique en saison estivale. Ceci s'explique, à notre avis, des particularités du mode de consommation en eau chaude relatif à notre choix « Camping permanent » dans le paramétrage dans T\*SOL de la consommation d'ECS. Ce choix a été adopté du fait que nous avons une base de vie permanente justifiant parfaitement cette sélection.

On constate également la montée de l'énergie d'appoint électrique consommée pendant la saison d'hiver. Ceci est justifié par les températures extérieures basses pendant cette saison (eau plus froide et capteurs plus au froid externe) et la diminution du taux d'ensoleillement.

**Pertes thermiques (capteurs et tuyauterie) :**

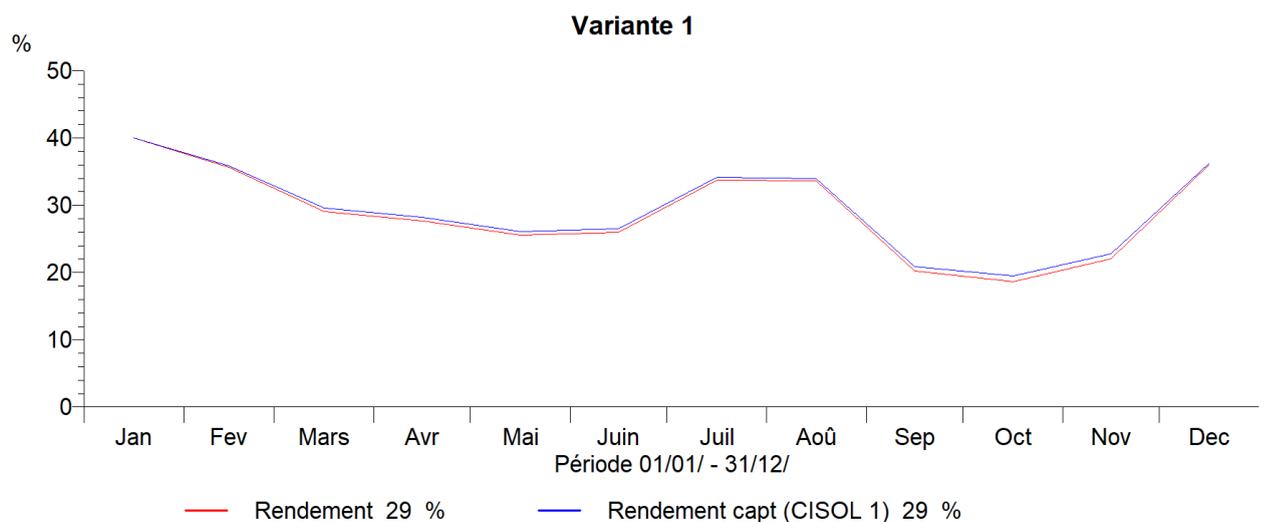


**Figure IV.11 :** Pertes thermiques : capteurs et tuyauterie (extérieure et intérieure).

Cette courbe montre que les pertes thermiques au niveau des capteurs sont largement supérieures à celles au niveau de la tuyauterie (conduite du liquide calorifique) extérieure et intérieure du bâtiment dans lequel est installé le ballon d'eau chaude.

Ceci s'explique avant tout par la bonne isolation thermique que nous avons adoptée pour notre installation (200mm d'épaisseur et 0.034 W/K de conduction thermique, comme montré précédemment) et par la minimisation de notre part de longueur de la conduite du circuit de liquide calorifique (12 mètres au total), ce qui a contribué positivement dans ce résultat.

**Rendement (circuit capteurs et système) :**



**Figure IV.12 :** Evolution du rendement (circuit capteurs et système).

Généralement, l'efficacité d'une installation est mesurée par son rendement. La figure ci-dessus montre une légère augmentation des rendements du circuit capteurs et du système dans sa totalité en saison pleinement chaude de l'été et en saison froide de l'hiver. Notre installation a montré des performances optimales en Janvier en atteignant son rendement maximal de 40%. Cela peut s'expliquer par les températures basses durant cette période faisant partie d'une plage appropriée pour que le circuit capteur, intervenant grandement dans le rendement du système, fonctionne correctement. Expliquons ceci par l'usage augmenté de la résistance électrique durant cette période froide de l'année, ce qui augmente le rendement du système du fait de la baisse des pertes thermiques externes du circuit capteur souvent à l'arrêt durant cette période.

Concernant la période chaude de l'année, on pense que le rendement augmente dans cette période à cause de l'augmentation de la chaleur ambiante qui se rapproche de plus en plus à celle de l'eau chaude en sortie du capteur. Cette différence de température réduite minimisera forcément l'échange thermique entre les deux ce qui réduit les pertes thermiques et donc augmente le rendement. Enfin, notons que le rendement global moyen de notre installation est de 29% ce qui est à notre avis satisfaisant.

#### IV.6 Bilan énergétique annuel

Montrons dans cette section une partie importante du rapport délivré par T\*SOL à l'issue de la simulation effectuée sur notre installation d'eau chaude sanitaire pour une base de vie SONATRACH au sud Algérien. Voici le tableau de bord de cette simulation :

Puissance installée:		32,430 kW
Surface de capteurs installée (brute):		70 m <sup>2</sup>
Irradiation sur la surface du capteur (Surface de réf.):	143 522,92 kWh	2 050,33 kWh/m <sup>2</sup>
Énergie délivrée par les capteurs:	42 651,50 kWh	609,31 kWh/m <sup>2</sup>
Énergie délivrée par le circuit de capteurs:	41 896,01 kWh	598,51 kWh/m <sup>2</sup>
Énergie fournie pour le chauffage eau chaude sanit:		44 497,75 kWh
Énergie système solaire pour l'ECS:		41 226,82 kWh
Apport d'énergie pour l'appoint:		4 231,9 kWh
<b>Économie Gaz naturel H:</b>		<b>0,0 m<sup>3</sup></b>
<b>Emission de CO2 évitée:</b>		<b>10 726,41 kg</b>
<b>Taux de couverture eau chaude:</b>		<b>90,7 %</b>
<b>Énergie économisé relative d'énergie supplémentaire (DIN EN 12977):</b>		<b>90,9 %</b>
<b>Rendement système:</b>		<b>28,7 %</b>

Figure IV.13 : Bilan énergétique annuel.

Ce bilan énergétique très utile montre beaucoup d'informations pertinentes au concepteur et au propriétaire de l'installation en même temps. Remarquons le total d'énergie d'appoint consommée annuellement de 4231,9 kWh qui est nettement minime par rapport au total d'énergie solaire 41226,82 kWh utilisée pour chauffer l'eau sanitaire pour les 100 personnes résidentes dans notre base de vie. Ceci montre le gain important qui peut être réalisé en investissant dans cette installation. Quant au taux de couverture en eau chaude de notre installation qui est 90,9 %, rien à dire sauf qu'il est très satisfaisant.

#### **IV.7 Conclusion :**

Nous venons dans ce chapitre d'étudier les performances de notre installation solaire de chauffage d'eau sanitaire pour une base de vie SONATRACH située au sud Algérien, dans la localité de Hassi Messaoud. Cette installation a été dimensionnée au niveau du chapitre précédent pour être justement confrontée à l'épreuve de plusieurs expérimentations à l'aide du logiciel de simulation solaire connu dans ce domaine T\*SOL.

Les résultats des différents tests réalisés ont montré l'intérêt du bon choix de matériaux d'isolation utilisés, autrement dit, des matériaux à faible conduction thermique. La longueur minimisée (au possible) du circuit du liquide calorifique a également contribué à l'amélioration des performances de notre installation, comme nous l'avons vu.

Concernant les paramètres climatiques, il s'agit pour notre application d'une région saharienne très chaude où le taux d'ensoleillement est parmi les plus élevés. Ceci a également contribué aux résultats obtenus, notamment au bon rendement global de notre installation et au taux de couverture en eau chaude très satisfaisant

## Conclusion générale

Les installations de chauffage d'eau solaires sont des dispositifs qui permettent de produire de l'eau chaude par la conversion de l'énergie du rayonnement solaire en chaleur. Une installation de ce type est composée essentiellement d'un panneau de captage thermique solaire relié via un circuit de liquide calorifique à un ballon de stockage d'eau chaude. Le circuit fait acheminer la chaleur captée par le panneau solaire vers l'eau contenue dans le ballon grâce à un circulateur régulé ou pompe à circulation régulée.

Dans ce travail, nous avons étudié et dimensionné une installation de ce type. Il s'agit exactement d'une installation solaire d'eau chaude sanitaire destinée à l'usage dans une base de vie permanente située au sud Algérien, exactement dans la région de Hassi Messaoud.

Le travail consistait à définir et dimensionner les différentes composantes de cette installation. Cette tâche a été bien réalisée en effectuant les différents calculs relatifs à cette tâche comme le calcul de l'énergie de chauffage d'eau journalière, le calcul du volume nominal du ballon, le calcul de la surface de captage solaire, le calcul des puissances : thermique et d'appoint électrique, et bien d'autres calculs importants. Les paramètres de la localisation géographique comme la température ambiante et le taux de rayonnement solaire ont été considérés.

Notre installation ainsi dimensionnée a été ensuite confrontée à une analyse expérimentale via un outil de simulation solaire connu dans le domaine T\*SOL. Les résultats obtenus montrent un taux de couverture en eau chaude sanitaire de notre installation dépassant les 90% avec un rendement assez satisfaisant avoisinant les 29%, ce qui nous a permis de valider le schéma de notre installation tout en insistant sur le dimensionnement et le choix des matériaux isolants des installations destinées aux régions froides ou à faible taux d'ensoleillement sans pour autant les surdimensionner ce qui pourra avoir un effet inverse.

## Bibliographie

- [1] Naïlée EBIBI, Thomas LEMAGNEN, Guillaume MARTI, Pierre AGUILAR, Yang FENG, Etude et dimensionnement d'une installation solaire thermique pour eau chaude sanitaire d'une collectivité, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN, 2009.
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil> consulté le 18 juin 2021.
- [3] K. IDJDARENE, 'Gisement solaire', cours première année Master, Faculté technologie, département génie électrique, université de Bejaïa.
- [4] 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.
- [5] Y. JANNOT, 'thermique solaire', édition mars 2011.
- [6] Livre génie énergétique « énergie solaire ». Calcule et optimisation 2011 de Jacques Bernard, la page 23.
- [7] Livre génie énergétique « énergie solaire ». Calcule et optimisation 2011, de Jacques Bernard, la page 207 et 208.
- [8] <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/panneau-solaire-photovoltaique-fonctionnement-etdescription-les-differents-types-de-panneaux-solaires-photovoltaiques-1> consulté le Mars 2022.
- [9] <https://www.lenergioutcompris.fr/produire-son-energie/panneaux-solaires-photovoltaiques/comment-camarche> consulté le Mars 2022.
- [10] <https://www.lenergioutcompris.fr/produire-son-energie/panneaux-solaires-photovoltaiques/comment-ca-marche> consulté le Mars 2021.
- [11] <https://www.photonpower.fr/energie-solaire-photovoltaique-avantages-et-inconvenients/> consulté le Mars 2022.
- [12] [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique) consulté le Mars 2022.

- [13] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermique> consulté le Mars 2022.
- [14] Livre « Eau chaude solaire ». Conception et installation des chauffe-eau solaires, de Chris Laughton, les pages 9, 10, 11,20.
- [15] <https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/avantages-inconvenients> le Mars 2022.
- [16] mémoire Mr : BENAKLI SAID OUALI Mr : ADDAD MASSINISSA le 2013  
Simulation. d'une installation solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et chauffage pour une maison individuelle.
- [17] <https://www.lenergietoutcompris.fr/travaux-renovation-energetique/chauffe-eau/solaireindividuel/fonctionne>
- [18] J. Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [19] Énergies renouvelables : le photovoltaïque et l'éolien CAP, Bac Pro ELEEC (2012)
- [20] 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.
- [21] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-thermique/composants>
- [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. Tlemcen : Université Abou Bekr Tlemcen, 2014, 159 p
- [23] 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.